



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사학위논문

Tertiary와 Secondary reserve간  
상호관계를 고려한 예비력 운영  
방법 연구

A New Operation Scheme of Reserves Based  
on the Interaction Between Tertiary and  
Secondary Reserves

2016 年 2月

서울대학교 대학원  
전기·정보 공학부  
박 준 형

# Tertiary와 Secondary reserve간 상호관계를 고려한 예비력 운영 방법 연구

A New Operation Scheme of Reserves Based  
on the Interaction Between Tertiary and  
Secondary reserves

지도교수 윤 용 태  
이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함

2016년 2월  
서울대학교 대학원  
전기·정보 공학부  
박 준 형  
2016년 2월

박준형의 공학박사 학위논문을 인준함

위 원 장	_____	박 종 근	(인)
부 위 원 장	_____	윤 용 태	(인)
위 원	_____	문 승 일	(인)
위 원	_____	김 건 중	(인)
위 원	_____	최 재 석	(인)

# 초록

전력 산업은 과거 정부 규제를 받는 수직 통합 규제 형태로 운영이 되었다. 하지만 많은 국가들은 구조 개편을 통한 계통 운영자, 발전 사업자, 판매 사업자로 전력 산업 체계를 분리하였고, 전력 산업 구성원들이 자유로운 경쟁을 통해 각자의 이익을 추구하는 경쟁을 도입하였다. 예비력 운영도 전력 산업 구조 개편에 따라 전력 시장을 통한 상품으로 거래가 되기 시작하면서 경제성을 반영한 예비력 운영에 많은 관심을 가지게 되었다.

예비력은 전력계통의 안정적인 운영을 위해 필수적인 요소이다. 수요 변동성에 의한 수요 imbalance 발생에 대비해서 SO는 적정량의 예비력 용량 확보와 운영이 필요하다. 현재 예비력 용량 결정 방법은 결정론적 방법과 확률론적 방법을 사용한다. 하지만 기존 용량 결정 방법은 실시간으로 변화하는 수요 imbalance를 반영하지 못하고 안정적인 계통 운영을 위해 과도한 예비력 용량을 확보할 가능성이 있다. 예비력 운영 관점에서 예비력은 각 국가별로 분류하는 기준이 각 국가의 계통 특성에 따라 다르지만 수급균형을 목적으로 수행되는 예비력 기능은 유사하다. 현재 예비력 운영은 각 예비력 자원별로 구분되어 그 역할이 존재하며, 예비력 운영 기준에 따라 각 예비력 자원의 출력량이 결정된다. 하지만 기존의

예비력 용량 결정 방법과 운영 방법은 이상 기온과 대규모 신재생 에너지원이 계통이 연계되는 미래 전력계통 환경에서 안정적인 운영을 보장할 수 없다. 대표적인 사례가 한국에서 발생한 9.15 정전사태이다. 9.15 정전사태는 이상 기온으로 수요 변동성이 증가하여 공급할 수 있는 예비력 자원이 부족하여 발생하였다. 당시 사고가 발생하지 않았다는 점에서 현재 예비력 운영 기준 상 사고 발생을 대비하여 확보된 예비력 자원인 tertiary reserve를 기동하는데 어려움이 있었으며 결국 SO는 계통 보호를 위해 순환정전을 수행하였다. 따라서 예비력 간 기능적으로 분류되는 기준을 완화하여 실시간 수요 imbalance에 대처할 수 있는 예비력 운영 방법이 필요하다. 즉, tertiary reserve를 사고기준으로 운영하는 것보다 비사고시의 수요 imbalance에 대처하는 secondary reserve 기능으로 활용 폭을 넓힘으로써 보다 안정적인 계통운동을 할 수 있다.

예비력 운영에서 tertiary reserve 활용 범위를 확대하면 실시간 수요 imbalance를 반영한 적정 예비력 용량을 결정할 수 있다. Tertiary reserve 투입량에 증가하면 secondary reserve 여유용량이 또한 증가하게 된다. 따라서 실시간 수요 imbalance를 반영한 secondary reserve 필요용량을 결정하여 과도한 secondary reserve 용량 확보를 억제할 수 있고 경제성 있는 예비력 운영을 수행할 수 있다.

본 연구에서는 예비력을 UCTE 기준인 primary, secondary, tertiary reserve로 분류를 하였고, 안정적이고 경제성 있는 계통 운영을 위해서

secondary와 tertiary reserve 간의 기능적, 경제적 상호관계를 고려한 예비력 운영을 방법을 제안하였다. 1장에서는 본 연구의 연구목표와 필요성에 대해서 설명하였고, 2장에서는 이론적 배경에 대해서 논의하였다. 3장에서는 예비력 운영 관련 선행연구에 대해서 설명하였고 4장에서는 분류된 예비력을 수학적으로 모델링하였다. 5장에서는 본 연구에서 최적해를 구하는 방법인 유전 알고리즘에 대해서 소개를 하였고, 알고리즘을 통해 얻은 결과를 6장의 사례연구에서 나타냈다. 사례연구에서는 먼저 실시간 모의를 위한 실시간 수요 imbalance 모델링과 두 예비력 간의 기능적 경제적 상호관계에 대해서 규명하였다. 그리고 가격신호를 반영하여 경제성 평가와 tertiary reserve 출력 속도에 따른 secondary reserve 용량 변화에 대해서 설명하였다. 마지막으로 7장의 결론으로 본 연구를 정리하였다.

주요어 : 주파수제어예비력, 예비력 운영, secondary reserve, tertiary reserve, 예비력 간 상호관계, 수요 imbalance

학 번 : 2008-20888

# 목 차

초록	i
목차	iv
그림 목차	vii
표 목차	ix
기호 및 약어	x
제 1 장 서론	1
1.1 연구 목표 및 필요성	1
1.2 연구 개요 및 구성	5
제 2 장 이론적 배경	7
2.1 예비력의 정의	7
2.2 예비력 분류 기준	9
2.2.1 해외 예비력 분류 기준	9
2.2.2 국내 예비력 분류 기준	12
2.3 주파수 제어와 예비력간의 관계	16
2.3.1 Primary reserve control	18
2.3.2 Secondary reserve control	19
2.3.3 Tertiary reserve control	20
2.3.4 주파수제어예비력 역할 정의	21

2.4 전력시장 개념과 역할	24
2.4.1 시점에 따른 시장 분류	24
2.5 9.15 정전사태의 시사점	29
 제 3 장 예비력 운영 관련 선행 연구	 32
3.1 예비력 운영 관련 연구 동향	32
3.1.1 결정론적 예비력 용량 결정 방법	33
3.1.2 확률론적 예비력 용량 결정 방법	37
3.2 예비력 간의 상호 기능적 관계를 고려한 용량 결정	45
3.2.1 선행 연구의 주요 내용	45
3.2.2 선행 연구의 한계점	47
 제 4 장 주파수제어예비력 모델링	 52
4.1 Primary reserve 모델링	53
4.2 Secondary reserve 모델링	54
4.3 Swing equation	55
4.4 Tertiary reserve 모델링	60
4.4.1 Tertiary reserve 출력 형태 및 전제 조건	60
4.4.2 Tertiary reserve 출력 증가 부분	62
4.4.2 Tertiary reserve 출력 감소 부분	66



제 5 장 예비력 운영 방법 모델링	69
5.1 유전알고리즘	69
5.2 예비력 운영 모델링	71
제 6 장 Illustrative Example	75
6.1 수급 imbalance 모델링	75
6.2 예비력 간 기능적, 경제적 상호관계 결과 분석	80
6.2.1 예비력 간 기능적 관계	80
6.2.2 예비력 간 경제적 관계	84
6.3 경제성 평가	89
6.4 시지연 크기 변화에 따른 예비력 운영	93
6.5 선행 연구 예비력 운영 방법과의 차이점	96
제 7 장 사례 연구	99
7.1 915 순환 정전 상황	99
7.2 915 순환 정전 수요 Imbalance	100
7.3 915 순환 정전 모의	102
제 7 장 결론	106
참고문헌	109

# 그림 목차

그림 2.1 북미의 운영예비력 역할 .....	11
그림 2.2 국내 예비력 분류 및 정의 .....	13
그림 2.3 각 국가의 주파수제어예비력의 분류 체계 비교 .....	15
그림 2.4 예비력운영과 주파수제어와의 관계 .....	17
그림 2.5 주파수제어예비력 역할과 투입 절차 .....	21
그림 2.6 시간 흐름에 따른 전력시장 분류 .....	25
그림 2.7 9.15 정전사태 시 주파수 측정 결과 .....	29
그림 3.1 선행연구의 예비력 운영 방법 .....	46
그림 4.1 주파수제어예비력의 역할 .....	52
그림 4.2 Primary reserve 모델링 .....	54
그림 4.3 Secondary reserve 모델링 .....	55
그림 4.4 Swing equation (1) .....	56
그림 4.5 Electrical power와 sync system 부하 .....	57
그림 4.6 Swing equation (2) .....	57
그림 4.7 Swing equation (3) .....	58
그림 4.8 주파수제어예비력 출력 모델링 .....	58
그림 4.9 수요변동에 따른 primary와 secondary reserve 출력 .....	59

그림 4.10 Tertiary reserve 출력 .....	61
그림 4.11 $jk$ 시점에서 기동된 tertiary reserve 출력량 .....	64
그림 4.12 $(j-l)k$ 시점에서 기동된 tertiary reserve 출력량 .....	65
그림 4.13 Tertiary reserve의 출력량 감소 영역 .....	66
그림 5.1 유전알고리즘에서 최적해 탐색 방법 .....	69
그림 6.1 Jump 발생 time interval .....	78
그림 6.2 수요 Imbalance - Random walk .....	79
그림 6.3 수요 Imbalance - Jump diffusion (1) .....	79
그림 6.4 수요 Imbalance - Jump diffusion (2) .....	79
그림 6.5 Tertiary reserve 출력량 비교 (1) .....	82
그림 6.6 Tertiary reserve 출력량 비교 (2) .....	82
그림 6.7 Tertiary reserve 출력량 비교 (3) .....	83
그림 6.8 Tertiary와 Secondary reserve 출력량 비교.....	83
그림 6.9 Tertiary와 Secondary reserve 출력량의 합.....	84
그림 6.10 가격 비율 변화에 따른 secondary reserve 필요량 ( $t_d=300(\text{sec})$ ) .....	86
그림 6.11 최적 secondary reserve 필요용량에 따른 tertiary reserve 출력량 ....	87
그림 6.12 Tertiary와 Secondary reserve 출력량 비교.....	88
그림 6.13 Tertiary와 Secondary reserve 출력량의 합.....	88
그림 6.14 예비력 운영에 따른 tertiary reserve 출력량 변화 .....	91
그림 6.15 Tertiary reserve 출력 속도에 따른 예비력 운영 변화 .....	93

그림 6.16 시지연( $t_d$ ) 변화에 따른 tertiary reserve 출력량 변화 .....	94
그림 7.1 사례 연구 수요 Imbalance .....	102
그림 7.2 수요 Imbalance와 Secondary reserve 출력 가능용량 .....	103
그림 7.3 부하 차단 수행 유/무에 따른 주파수 모의 결과 .....	103
그림 7.4 Tertiary reserve 확대 운영에 따른 결과 그래프 .....	104

# 표 목차

표 2.1 ENTSO-E의 주파수제어예비력 기준 .....	10
표 2.2 북미 운영예비력 분류 기준 .....	12
표 2.3 9.15 정전 사태 이전 국내 운영예비력 분류 기준 .....	13
표 2.4 9.15 정전 사태 이후 국내 운영예비력 분류 기준 .....	14
표 3.1 국가 별 예비력 필요용량 결정 방법 .....	36
표 4.1 Tertiary reserve 출력을 결정하는 파라미터 .....	62
표 6.1 수요 Imbalance 모델링을 위한 입력 값 .....	78
표 6.2 Tertiary reserve의 투입량과 투입시점 ( $t_d=300(\text{sec})$ ) .....	80
표 6.3 Secondary reserve 필요용량에 따른 예비력 사용량 .....	81
표 6.4 가격비율에 따른 예비력 운영 결과 값 ( $t_d=300(\text{sec})$ ) .....	85
표 6.5 가격 비율에 따른 예비력 사용량과 비용 .....	86
표 6.6 수요 Imbalance 구분에 따른 기존 예비력 운영에서 secondary reserve 필요용량 정의 ...	89
표 6.7 예비력 가격 기준 정보 .....	90
표 6.8 예비력 운영에 따른 결과 .....	92
표 6.9 시지연( $t_d$ ) 변화에 따른 예비력 운영 결과 .....	95
표 6.10 시지연이 없는 예비력 운영 결과 .....	96
표 7.1 시간대별 915 순환정전 상황 정보.....	100
표 7.2 915 순환정전 당시 수요 Imbalance와 Secondary reserve 용량.....	101



# 기호 및 약어

$\Delta f$  : 정격 주파수와의 오차

$SR_i^t$  : 시간  $t$ 에서 발전기  $i$ 의 순동예비력 공급가능용량

$P_{sch,i}^t$  : 발전기  $i$ 의 계획된 공급량

$P_i^{\max}$  : 발전기  $i$ 의 최대발전가능용량

$u_i^t$  : 발전기  $i$ 의 기동정지 지표( $i=0$ , 정지;  $i=1$ , 기동)

$\tau$  : 순동예비력 실행 기준시간

$I$  : 예비력 공급에 참여하는 발전기 수

$SR_d^t$  : 순동예비력 필요 용량

$\alpha_d$  : 첨두부하의 일정 비율

$\beta_d$  : 기간 내 최대수요 혼합 비중 값

$P_d^{\max}$  : 최대 수요 변화량

$\Pr_Y$  : 공급( $P_g$ )가 수요( $P_d$ )보다 부족하거나 같은 확률

$UC_{risk}$  : 기동정지계획 위험도(Unit Commitment Risk)

$\Pr_X$  :  $X$ [MW] 이상의 부하차단이 발생할 누적확률

$m_i^t$  : 발전기  $i$ 의 공급가능여부를 나타내는 지표. ( $m_i=0$ :공급중지,  $m_i=1$ :공급)

$\sigma_j$  : 발전기 1기 탈락 시 부하차단 지표 ( $\sigma_j=0$ : 부하차단 없음,  $\sigma_j=1$ : 부하차단 발생)

$\sigma_{jk}$  : 발전기 2기 탈락 시 부하차단 지표 ( $\sigma_{jk} = 0$ : 부하차단 없음,  $\sigma_{jk} = 1$ : 부하차단 발생)

$P_{sch,j}$  : 발전기  $j$ 탈락으로 발생하는 공급지장 에너지량

$SR_j$  : 발전기  $j$ 탈락으로 발생하는 순동예비력량

$\Gamma(SR_d)$  : 순동예비력량이  $SR_d$ 일 때의 사회적 비용

$\Pi(SR_d)$  : 순동예비력량이  $SR_d$ 일 때의 에너지 및 순동예비력 공급비용

$E(SR_d)$  : 순동예비력량이  $SR_d$ 일 때의 공급지장비용 기대값

$T_e$  : 터빈-발전기의 전기적 토크

$T_m$  : 터빈의 기계적 토크

$P_S^C$  : Secondary reserve 필요 용량

$\Delta P_D$  : Damping 현상에 따른 수요 변화

$\Delta P_G$  : 발전기 출력량 변화

$\Delta P_L$  : 수요 imbalance의 크기

$D$  : Damping 계수

$f_{ss}$  : 1차 제어 이후 준정상상태 주파수

$R$  : 발전기 droop 특성 (Droop Characteristic)

$P_p(s)$  : S-domain에서 primary reserve 출력량

$RS$  : Reference setpoint

$T_g$  : Geovernor 시지연 상수



$T_{ch}$  : Turbine 시지연 상수

$P_S(s)$  ; S-domain에서 secondary reserve 출력량

$t_d$  : Tertiary reserve의 cold start-up time

$t_{r-up}$  : Tertiary reserve의 ramp up time

$t_{r-dn}$  : Tertiary reserve의 ramp down time

$J$  : Simulation 모의 전체 구간

$j$  : Tertiary reserve 투입 결정 시기 index ( $J=jM$ )

$k$  : Tertiary reserve 투입량 결정 주기(15분)

$C_j$  : j번째 투입 시점에서 tertiary reserve 투입량

$P_T(t)$  : t시간에 tertiary reserve 출력량

$P_S(t)$  : t시간에 secondary reserve 출력량

$P_L(t)$  : t시간에 수요 imbalance 크기

$r_{up}$  : Tertiary reserve의 ramp up rate

$r_{dn}$  : Tertiary reserve의 ramp down rate

$P_{\min}^T$  : Tertiary reserve의 최소 투입량

$M$  : Tertiary reserve

$\epsilon$  : 주차수 허용 오차 범위

$\rho_S^r$  : Tertiary 대비 secondary reserve의 가격 비율(ratio)

$\rho_{S,gr}^E$  : Secondary reserve 에너지 비용 기울기

$\rho_{S,c}^E$  : Secondary reserve 에너지 비용 y절편

$\rho_{T,gr}^E$  : Tertiary reserve 에너지 비용 기울기

$\rho_{T,c}^E$  : Tertiary reserve 에너지 비용 y 절편

$\rho_{S,gr}^C$  : Secondary reserve 용량 비용 기울기

$\rho_{S,c}^C$  : Secondary reserve 용량 비용 y절편

$\sigma$  : Jump diffusion 수요 모델에서 변동성 지수

$\alpha$  : Jump diffusion 수요 모델에서 경향성 지수

$N_t$  : Jump diffusion 수요 모델에서 jump 발생 횟수

$W_i$  : i번째 Jump 발생 time interval

$Y_i$  : i번째 Jump 발생 크기

AS : 계통운영보조서비스 (Ancillary Service)

SO : 계통운영자(System Operator)

NERC : North American Electric Reliability Corporation

ENTSO-E : European Network of Transmission System Operators for Electricity

UCTE : Union For The Co-ordination of the Transmission of Electricity

EMS : 계통운영시스템(Energy Management System)

AGC : 자동발전제어(Automatic Generation Control)

ACE : 지역제어오차(Area Control Error)

ED : 급전계획(Economic Dispatch)

LOLP : 공급지장확률(Loss of Load Probability)

EENS : 공급지장전력량 기대치(Expected Energy Not Supplied)

VOLL : 공급지장비용(Value of Lost Load)

# 제 1 장 서론

## 1.1 연구 목표 및 필요성

전력 산업은 과거 정부 규제를 받는 수직 통합 형태로 운영이 되었다. 하지만 1980년대 이후 세계 많은 국가들은 구조 개편을 통한 계통 운영자, 발전 사업자, 판매 사업자로 전력 산업 체계를 분리하였고, 전력 산업 구성원들이 자유로운 경쟁을 통해서 각자의 이익을 추구하는 경쟁을 도입하였다. 즉, 전력 산업에 경쟁을 도입하여 자유화(liberalization), 탈규제화(deregulation), 구조개편(restructuring)을 추진해왔다[1-3]. 이와 같은 전력 산업의 변화로 발전, 송전, 예비력이 전력 시장을 통해서 상품으로 거래가 되었다. 하지만 과거 수직 통합 체제에서 발전과 송전 부분은 경제적 측면을 고려하였지만 예비력의 경우 수급 균형을 위해 당연한 부분으로 인식되어 경제적 측면은 크게 고려하지 않았다. 이러한 예비력의 경우 경쟁 체제가 도입된 전력 시장 체제 이후에 인식되었기 때문에 전력 산업에서 경제성을 반영한 예비력 운영에 많은 관심을 가지게 되었다. 또한 미래 전력계통 환경에서 이상기후의 발생빈도가 커지고 불확실성이 큰 출력 특성을 가진 신재생 에너지원의 계통 연계 확대로 수요 imbalance가 더욱 커지기 때문에 수급 균형을 위한 예비력 운영의 중요성이 크게 증가

하고 있다[4-7].

예비력은 수요 imbalance가 발생하였을 경우 수급 균형을 위한 여분의 공급 가능한 발전 자원을 의미한다. 수요 imbalance 원인으로는 사고와 정상상황으로 분류할 수 있다. 사고는 발전기 탈락과 같은 예상치 못한 사고에 따른 수요 imbalance가 발생한 경우를 의미하며, 정상상황은 사고 상황이 아닌 수요 예측 오차에 따라 실시간으로 변화하는 수요 imbalance를 의미한다. 이러한 수요 imbalance 분류 기준에 따라서 예비력 운영이 이루어지고 있다. 실시간 수요 변동에 따른 수요 imbalance의 경우 현재 기동 중인 발전자원 여유 용량으로 수급 균형을 하고 있는 반면, 발전기 탈락과 같은 사고 상황에서는 기동되지 않은 새로운 발전원을 투입함으로써 수급 균형을 하고 있다[5],[8-11]. 하지만 최근 불확실성이 크게 증가하여 정상상황에서도 사고기준의 큰 수요 imbalance가 발생하였으며, 대표적인 사례가 2011년 9월 15일 국내에서 발생한 순환정전이다. 사고 상황이 발생하지 않았음에도 불구하고 이상기온으로 수요가 급증하여 큰 수요 변동성이 발생하였다. 따라서 미래의 불확실성에 따른 큰 수요 변동성에 대응하기 위해서 예비력을 사고 발생 기준으로 분리해서 운영하기 보다는 불확실성에 따른 수요 imbalance를 고려해서 운영할 필요가 있다.

경쟁 시장 체제에서 예비력 운영은 계통 운영자(system operator, SO)에 의해서 수행이 되며, 유효전력의 수급 균형을 유지할 책임이 있다.

만약, 수급 균형이 되지 않으면 주파수 변화가 일어나며 계통 운영상 안정성에 큰 문제를 일으킨다. 따라서 SO는 수급 균형을 통해서 최종적으로 주파수가 적정 오차 범위 내로 유지시키는 것이 목적이기 때문에 이러한 예비력을 주파수제어예비력(frequency control reserve)이라고 정의하였다. SO는 이러한 예비력 필요량을 결정하는데 있어서 크게 두 가지 방법을 사용하였다. 먼저 결정론적 방법은 계통에서 발생할 수 있는 가장 큰 사고의 크기를 기준으로 예비력 필요량을 결정하는 것이다. 그러나 예비력 필요량과 공급지장 간에 경제성을 반영하지 못한다는 한계점이 있기 때문에 경제적으로 비효율적이다. 이러한 방법을 보완하기 위해서 확률론적 방법을 적용하여 예비력 필요량을 결정하였다[12-15]. 확률론적 방법은 전력수요 및 전력계통의 확률적 특성을 반영하여 정의된 평가기준에 따라 예비력 필요량을 결정하며, 계통의 불확실성과 경제성을 고려한다는 점에서 결정론적 방법을 보완하였다고 볼 수 있다[6],[8].

하지만 기존 예비력 운영은 공급지장 비용과 예비력 운영비용의 합이 최소화가 되는 예비력 전체 필요량을 결정하는데 한계가 있다. 즉, 주파수 제어예비력 내의 primary, secondary, tertiary reserve간 기능적 특성을 고려해서 예비력 필요량을 결정하지 않았고 전체 예비력 필요량만을 결정하였다. 또한 예비력 운영 측면에서 예비력 간 관계를 고려하지 않고 각 예비력 용량을 할당을 한 측면에서 한계가 있다. 다시 말해서, 기존 예비력 운영 시 tertiary reserve는 사고 상황 시 SO에 의해서 투입이 결정

되지만, 정상 상황 시에도 tertiary reserve를 투입하여 secondary reserve와 기능적 보완 관계를 형성함으로써 적정 secondary와 tertiary reserve 필요량을 결정할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 주파수제어예비력을 분류하여 예비력 간의 기능적, 경제적 상호관계를 고려해서 tertiary reserve의 투입시점, 투입량과 secondary reserve 필요량 간의 관계를 분석하고 두 예비력 필요량을 결정하는 방법을 제안하고자 한다.

본 논문에서 제시하는 예비력 운영 방법을 설명하기에 앞서 주파수 제어예비력 분류 체계와 각 예비력의 역할과 예비력간의 관계에 대해서 정의하였다. 그리고 예비력관련 선행 연구를 분석하여 본 논문과의 차별성을 정리하였으며, primary, secondary reserve 출력을 주파수 변화에 따른 수식으로 정식화 하였다. Tertiary reserve는 시지연을 고려하여 출력 특성을 수학적으로 모델링하였고, 수급불균형과 경제적 상황 변화에 따라 예비력 투입시점, 투입량과 필요량을 결정하는데 유전알고리즘으로 제안하였다. 본 논문은 기존 예비력 운영 방법과는 다르게 사고 상황이 아닌 시점에서 tertiary reserve 투입시점과 투입량을 결정하여 불확실성이 큰 미래 전력계통 환경에서 안정적인 계통운영이 가능하고, tertiary reserve 출력에 따른 secondary reserve와의 기능적 관계를 통해서 적정 secondary reserve의 필요량 결정할 수 있다는 점에서 의의가 있다.

## 1.2 연구 개요 및 구성

본 논문에서는 분류된 주파수제어예비력의 출력 특성을 정의하고 tertiary reserve 출력을 수학적으로 정식화 하였다. 그리고 tertiary reserve의 투입시점과 투입량, secondary reserve의 필요량을 두 예비력 간 상호관계를 고려하여 모델링하였다.

제 1장에서는 본 논문의 연구목표와 필요성, 그리고 연구개요 및 구성에 대해 설명한다.

제 2장에서는 논문을 이해하는데 필요한 이론적 배경을 설명한다. 국내외 예비력 운영 체계와 기능적 특성과 9.15 정전 사태를 통해서 본 연구의 시사점을 설명한다.

제 3장에서는 예비력 운영 관련 선행 연구에 대해서 설명하고자 한다. 기존 예비력 운영 방법인 결정론적 결정 방법과 확률론적 결정 방법에 대해서 설명하고 예비력 상호 기능적 관계를 통해서 예비력 용량을 결정하는 선행 연구를 분석한다.

제 4장에서는 주파수제어예비력을 수학적으로 모델링 하였다. 발전기와 시스템 모델을 통해서 주파수 변동에 의한 primary와 secondary reserve를 수식화 하였다. 그리고 시지연을 고려한 tertiary reserve 출력량을 수학적으로 모델링 하였다.



제 5장에서는 본 연구에서 제안하는 예비력 운영 방법의 최적 해를 구하기 위해서 적용한 유전알고리즘을 설명하였다. 유전알고리즘 적용을 위한 목적함수와 제약조건을 정의하였다.

제 6장에서는 최적 예비력 운영 방법의 사례연구를 제시하였다. 먼저, 실시간 모의를 위한 실시간 수요 imbalance 값을 생성하기 위해서 random walk와 jump diffusion 수요 모델링을 정리하였다. 그리고 secondary와 tertiary reserve 간의 기능적, 경제적 상호관계에 대해서 규명하였고, 가격 신호를 반영하여 경제성 평가를 하였다. 그리고 tertiary reserve 출력량 속도를 변화시키면서 secondary reserve 필요용량이 어떻게 변화하는지 보였다. 마지막으로 선행연구의 예비력 운영 방법 결과와 비교하였다.

제 7장에서는 본 논문의 결론으로 연구 결과를 정리한다.

## 제 2 장 이론적 배경

제 2장에서는 본 연구 주제에 대한 이론적 배경으로서 예비력의 정의와 분류, 주파수 제어와 예비력간의 관계에 대해서 설명하고자 한다. 그리고 9.15 순환정전 사태를 분석하여 본 연구에 대한 시사점을 도출하였다.

### 2.1 예비력의 정의

주파수제어예비력은 수급균형을 위한 여분의 발전자원을 의미한다. SO는 에너지 시장에서 경제급전을 수행하여 하루 동안 한 시간 단위의 공급계획을 세운다. 이러한 발전기 출력배분은 수요 변동이 일어나지 않는다는 가정 하에 예측된 수요를 기반으로 결정이 된다. 하지만 실시간에서의 수요예측 오차나 발전기 탈락과 같이 예측 불가능한 일이 발생할 수 있기 때문에 실시간에서의 수요 변동성은 항상 존재하게 된다. 이러한 실시간 수급균형을 위해서 별도의 서비스 체제를 주파수제어서비스라고 하며, 이를 위한 주요 공급자원을 주파수제어예비력이라고 한다. 이러한 주파수제어예비력 분류 체계는 각 국가별로 상이하다. 북미에서는 운영 예비력이라는 용어를 사용하며, 유럽 지역에서는 주파수제어예비력이라는 용어를 일반적으로 사용하는데 국가별로 상이한 예비력 관련 용어를 본

연구에서는 명확한 이해를 위해서 UCTE 기준을 적용하여 primary reserve, secondary reserve, tertiary reserve 세 가지 예비력으로 분류하고자 한다[8-12].

## 2.2 예비력 분류 기준

### 2.2.1 해외 예비력 분류 기준

예비력을 분류하는 체계가 각 국가별 계통 특성에 따라 다르다. 따라서 국가별로 다른 예비력 분류 체계를 예비력 운영 기준에 따라 비교하고 체계화 하는 것이 필요하다. 먼저 주파수제어기준에 따라 예비력을 분류한 유럽송전망운영자(European Network of Transmission System Operators for Electricity, ENTSO-E)에서는 다음의 표 2.1과 같이 예비력을 분류하였다. ENTSO-E에서는 예비력을 주파수에 대응하는 공급자 원으로 정의를 하며, 본 연구에서 분류하는 기준과 같이 primary, secondary, tertiary reserve로 분류를 하였다[16]. Primary reserve는 governor free에 의해서 주파수가 변화할 때 자동적으로 출력량이 제어되며, secondary reserve는 automatic generation control (AGC)로 정의가 된다. 마지막으로 tertiary reserve는 secondary reserve가 부족할 경우 SO에 의해서 manual control로 출력이 정의가 된다[4][8][11].

북미의 운영 예비력 체계는 그림 2.1과 같이 정리할 수 있다[17]. 앞 절에서 언급했던 것처럼, 북미에서는 운영예비력을 실시간 계통에서 운영하는 예비력의 포괄적 개념으로 사용한다. 그러나 미국의 PJM과 CAISO는 운영 예비력을 1차 제어에 따른 발전기 조속기 동작을 제외한 예비력

표 2.1 ENTSO-E의 주파수제어예비력 기준

ENTSO-E 주파수제어예비력		
주파수제어 예비력 분류기준	Primary control reserve	- Governor free 운전에 의한 제어 - 작은 수요 imbalance - 사고 발생 시 주파수 탈락 방지 목적
	Secondary control reserve	- 주파수 오차에 의한 AGC - 사고 발생 시 정상 주파수 회복
	Tertiary control reserve	- 일간 수요예측 오차에 대한 출력 조정 - 사고 발생 시 정상 주파수 회복 - Secondary reserve 여유용량 확보

으로 사용하기 때문에, 용어의 사용이 어느 기준을 따른 것인지 확인하는 것은 매우 중요하다[9-10].

북미 운영예비력 기준에서 가장 주목해야할 부분은 운영예비력을 목적기준에 따라 사고와 비사고로 분류한 것이다. 비사고 범주(category)는 정상 상태(normal operation)에서 지속적으로 발생하는 수요의 변동과 예측된 수요의 증가량에 대응하는 예비력이 포함된다. 조정예비력(regulating reserve)는 정의상 계통운영보조서비스의 신호에 따라 자동적으로 작동하는 AGC를 통해 제어되는 예비력을 의미한다. 여기서 비사고 범주에는 primary reserve에 해당되는 부분이 제외되어 있는데, 그 이유는 미국의 경우 계통의 크기가 크기 때문에 발전기 탈락 등의 사고가 발생하지 않으면 primary reserve의 불감대(dead band)를 벗어나지 않다는 의미를 내포하고 있다. 부하추종(load following)은 예측한 20분 정도 이상 장주기 변동을 대응하는 예비력으로써 정의된다[4].

## Operating Reserve

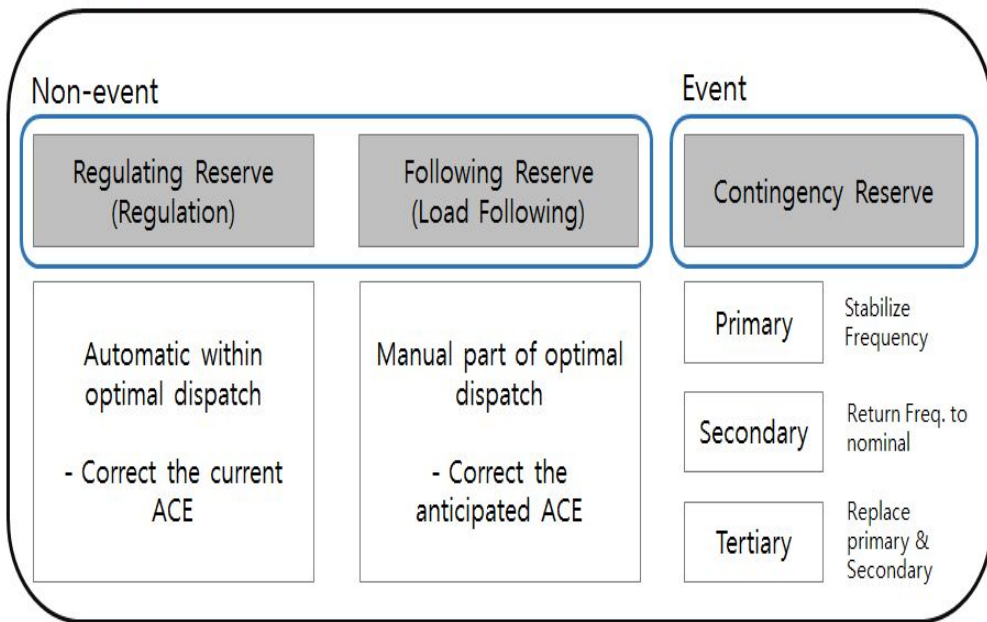


그림 2.1 북미 운영예비력 역할

그림 2.1의 북미 운영예비력은 사고 시 primary, secondary, tertiary reserve로 분류가 되었다. 각 국가별로 계통 상황이 다르기 때문에 분류 방법이 다양하며 우리나라와 유럽과는 다른 특징이 있다. 사고 예비력은 상정고장이 발생하였을 때 대응하는 예비력을 정의한 것이다. 상정고장이 발생 시 주파수의 하락에 대한 발전기 및 부하의 자동적 대응으로서 primary reserve가 출력되며, secondary reserve는 primary reserve 종료 후 남아있는 준 정상상태 주파수를 본래 정상 주파수로 돌리기 위해서 작동된다. 그리고 tertiary reserve는 보통 발전기 탈락 등의 대형 사고가 발생하면 그 용량만큼 복구 시켜주기 위해 실행된다.

표 2.2 북미 운영예비력 분류 기준

북미 NERC 운영예비력		
정상운전 유지	조정예비력 (Regulating reserve)	- AGC - 오차 범위 내에서 계통 주파수 유지
	부하추종 (load following)	- 20분 내외의 장주기 변동 및 큰 부하변동 대응
상정고장 대응	주파수응답예비력 (Frequency responsive reserve)	- Governor free 운전에 의한 제어 실시 - 사고 발생 시 주파수 탈락 방지
	순동예비력 (Spinning reserve)	- 순동 상태에서 상정사고 이후 계통주파수를 복구시키기 위한 역할
	비순동예비력 (Non-spinning reserve)	- 비순동 상태에서 상정사고 이후 계통주파수를 복구시키기 위한 역할
	대체예비력 (Supplemental reserve)	- 대규모 상정사고 대응 - 순동 및 비순동 예비력에 대한 Back-up 예비력

### 2.2.2 국내 예비력 분류 기준

국내 예비력 분류체계 및 운영예비력 기준은 2001년 전력시장의 도입과 함께 그림 2.2와 같이 수행되었다. 우리나라에서는 주파수제어예비력을 NERC와 같이 운영예비력이라 정의하였다[18-19].

2001년 운영예비력 기준이 정의된 이후, 2011년 9.15 순환정전이 발생하기 전까지 운영상의 변화는 없었다. 9.15 순환정전 사고 이전의 운영예비력 기준에 따른 각 예비력의 정의는 다음의 표 2.3과 같다. 주파수조정예비력 내에 ENTSO-E에서의 primary와 secondary reserve가 혼재되어 있다[19].

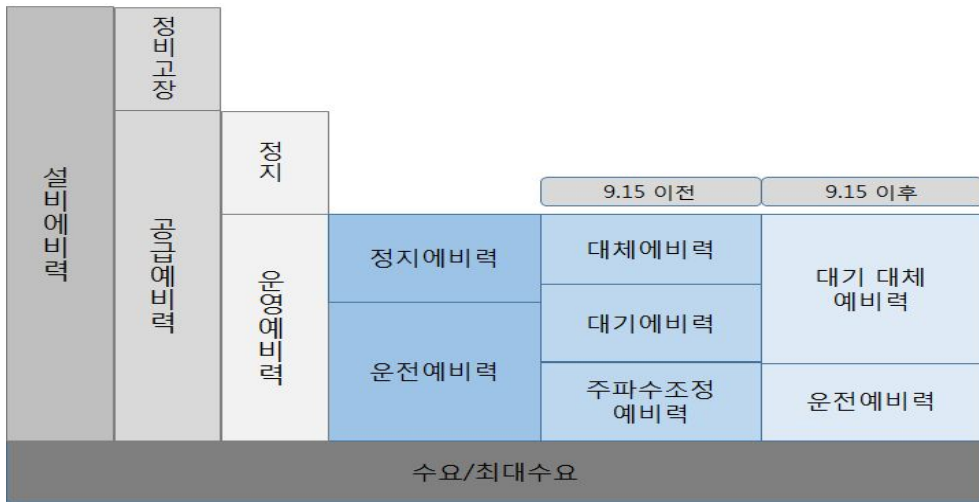


그림 2.2 국내 예비력 분류 및 정의

표 2.3 9.15 정전 사태 이전 국내 운영예비력 분류 기준

예비력 구분	역할
주파수조정예비력	<ul style="list-style-type: none"> <li>- AGC, Governor free로 구성</li> <li>- 작은 수요변화에 응동하여 주파수 유지</li> </ul>
대기예비력	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 수요예측오차와 발전설비 고장에 대응</li> <li>- 운전상태 (10분 이내) 투입</li> <li>- 정지상태 (20분 이내) 투입</li> </ul>
대체에비력	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 대단위 사고 발생에 대응 (발전소 및 송전선로 고장)</li> <li>- 120분 이내 이용 가능한 예비력</li> </ul>

9.15 순환정전 사고 이후, 응동이 빠른 예비력 발전원이 필요하여 응동시간이 빠른 예비력을 확대하는 방향으로 운영예비력의 기준이 변화였다. 응동이 빠른 예비력이 비용 측면에서 높기 때문에, 운영예비력 기준이 바뀐 이후로 비용이 증가하게 되어 비용효율성문제가 대두되고 있다[19].



표 2.4 9.15 정전 사태 이후 국내 운영예비력 분류 기준

예비력 구분	역할
주파수조정예비력	<ul style="list-style-type: none"> <li>- AGC, Governor free로 구성</li> <li>- 작은 수요변화에 응동하여 주파수 유지</li> </ul>
대기 대체예비력	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 수요예측오차와 발전설비 고장에 대응</li> <li>- 동하계 기간에 20분 이내 투입가능</li> <li>- 이외 기간은 120분 이내 투입가능</li> </ul>

9.15 순환정전 이후 개편된 운영예비력은 용어와 예비력 분류 측면에서는 NERC의 기준을 따르는 반면, 주파수조정예비력이라는 제어 기준은 ENTSO-E 기준을 따르는 혼합한 형태를 보인다. 다음의 그림 2.3은 NERC, ENTSO-E와 우리나라의 예비력 분류체계를 비교하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 우리나라의 주파수조정예비력이 primary와 secondary reserve가 통합된 개념이다. 하지만 실제 계통에서의 역할은 primary와 secondary reserve로 분리되어서 운영이 되고 있다. 또한 대기·대체예비력은 운영 기준 상 큰 수요변동 시 적용이 가능하지만 주파수조정예비력 용량이 크기 때문에 거의 운영되지 않고 사고 시에만 활용이 된다. 따라서 현 우리나라 운영예비력 기준을 현실에 맞게 분류를 할 필요가 있으며, 주파수제어예비력을 크게 계획하지 않고 대기·대체예비력, 즉 tertiary reserve와 상호 협조할 경우 효율적인 예비력운영이 기대된다.

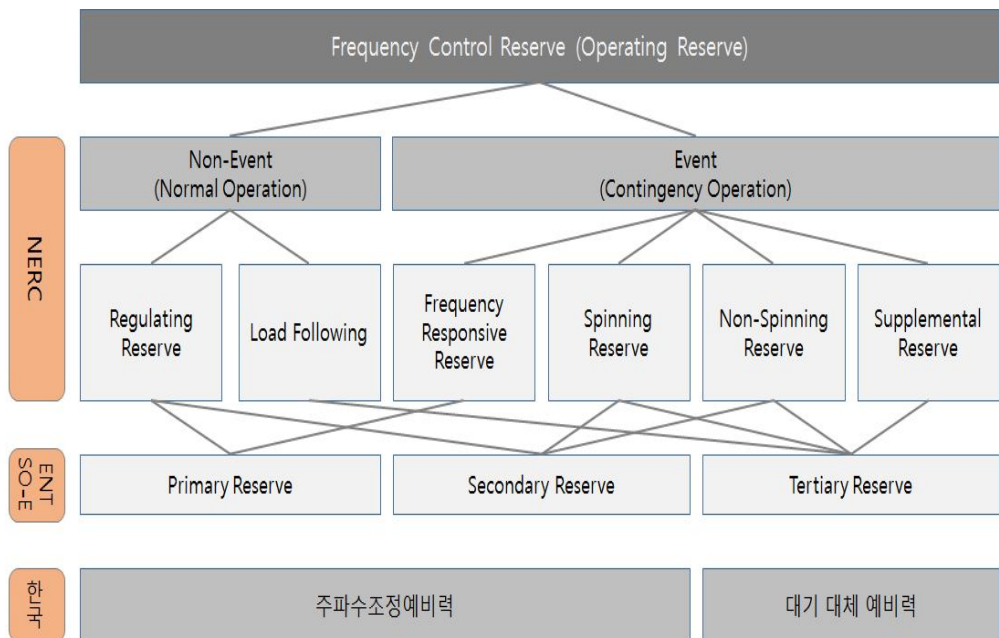


그림 2.3 각 국가의 주파수제어예비력의 분류 체계 비교

## 2.3 주파수 제어와 예비력간의 관계

전력 시스템에서 예비력운영은 실시간으로 변화하는 수요에 대응하기 위한 여분의 발전자원을 의미한다. 따라서 예비력 운영 목적은 수급균형에 있으며 이는 곧 주파수를 적정 범위 내로 유지하는 것이다. 실제 예비력이라는 것은 발전자원의 여유량인데 주파수 제어와는 어떠한 관계가 있는지 다음의 그림 2.4를 통해 확인할 수 있다.

예비력 운영의 목적은 수급균형인데 실제 SO는 수요와 발전량 data를 실시간으로 획득할 수 없다. 따라서 SO는 수요와 발전량 data 대신에 주파수 data를 활용하여 수급균형을 수행할 수 있다. 그림 2.4에서 확인할 수 있듯이 주파수 오차를 활용하여 primary, secondary, tertiary reserve의 출력량을 결정한다. 같은 주파수 오차가 입력으로 들어와도 primary reserve control과 secondary, tertiary reserve control에는 큰 차이가 있다. Primary reserve control은 governor free에 의해서 발전기 자체적으로 주파수제어를 통해 출력량을 결정한다. 반면에 secondary와 tertiary reserve control의 경우 주파수 오차 크기에 따라 SO가 각 발전기마다 출력 권고 값인 reference setpoint를 할당한다. 다만 secondary와 tertiary reserve control의 차이는 발전기의 기동 유무 상태이다. Secondary reserve control의 경우 기동중인 발전기의 출력 값을 generation allocation을 통해 재조정하는 반면, tertiary reserve control은 현재 기동되어있지 않은 발전기들을 SO가 manual로 기동시키는 것이다. 그리고

primary reserve control은 발전기 자체적으로 제어하기 때문에 실시간으로 제어가 가능하다. 하지만 secondary와 tertiary reserve control은 system 상에서 운영이 되기 때문에 실시간 단위로 이루어지지 않고, 실제 secondary reserve control 신호는 4초 주기로 발생한다[50-54]. 이러한 주파수 제어에 대한 기본적인 제어체계는 국가 별 계통 특성에 따라 약간의 차이가 있지만 유사하게 운영되고 있다. 본 절에서는 이러한 primary, secondary, tertiary reserve control의 출력 특성과 그에 따른 역할을 정의하였다.

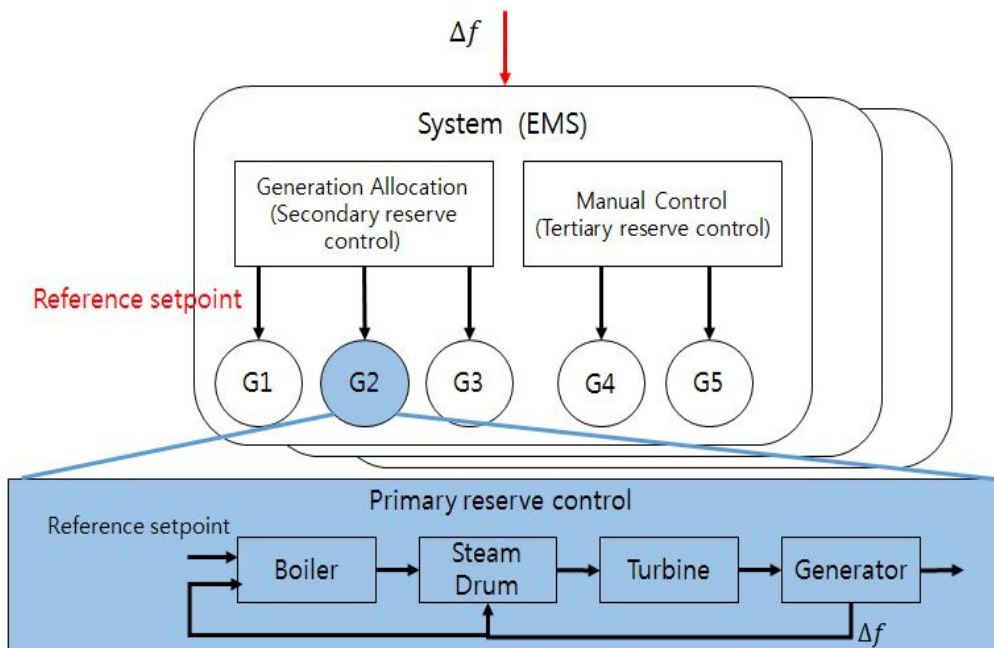


그림 2.4 예비력운영과 주파수제어와의 관계

### 2.3.1 Primary reserve control

Primary reserve control는 터빈-조속기 작동을 의미하며, primary control의 목적은 발전기 자체 제어를 통해 정격 주파수로 유지시키는 것이다. 또한 발전기 탈락이나 수요의 급변과 같이 큰 수요 변동이 발생했을 때 주파수의 급락을 방지하는 역할을 한다. 즉, 전력계통에 외란, 예측 오차에 의해 수급 균형이 발생하였을 때 primary reserve는 필요한 제어를 실시간으로 수행할 수 있다. 따라서 primary reserve에 참여하는 발전 자원은 기동되어 있는 상태이어야 하며, 주파수추종 운전(governor free), 조속기-터빈 제어(governor-turbine control), 그리고 주파수 응답(frequency response)로 불리기도 한다[20-22].

조속기에서는 회전자(rotor)의 속도변화를 입력받아 전기적 전력과 기계적 전력의 균형을 다시 맞추기 위해, 밸브를 조정하는 피드백 동작을 수행한다. 그러나 발전기는 주파수에 대한 민감도로 인하여 수하(droop) 특성이 발생하기 때문에, 주파수를 완전하게 회복시키지 못한다. 터빈-조속기 제어 작용은 터빈-발전기에는 회전하는 관성에 운동에너지가 저장되어, 계통 부하가 순간적으로 급증하면 저장되어있던 운동에너지가 방출되는 것을 의미한다. 이 때, 터빈-발전기들의 전기적인 토크( $T_e$ )가 증가한 부하에 응하기 위해 증가하고, 이 때 터빈의 기계적 토크( $T_m$ )는 일정하게 유지된다. 기계적 토크보다 전기적 토크보다 크게 되면 스윙 방정식

(swing equation)에 따라 터빈-발전기는 감속을 하게 되고, 운동 에너지가 방출되기 때문에 회전자 속도가 감소하게 된다[20-22]. 다시 말해, 수요가 공급보다 크다면 저장된 운동에너지가 방출하여 결과적으로 주파수는 떨어져 시스템 주파수가 감소하게 된다. 만약 반대로 공급이 수요보다 더 많게 된다면 반대로 시스템 주파수는 증가한다

### 2.3.2 Secondary reserve control

Secondary reserve는 primary reserve에 비해 응답 속도가 느리며 system 상에서 출력량이 결정된다. 즉, 주파수 오차가 발생하면 계통의 중심에 위치한 계통운영시스템(energy management system, EMS)의 신호주기(4초)에 맞추어 반응한다. Primary reserve는 사고 발생 시 정격 주파수로 복귀시켜주지는 못하고 정격 주파수와 일정 오차만큼 차이가 발생한 상태로 머물러 있다. 이러한 주파수 오차를 없애 정격 주파수로 복귀시키는 것이 secondary reserve의 목적이며, 주파수 복귀와 동시에 primary reserve의 여유용량이 초기 상태로 되돌아간다[20-22]. 즉, secondary reserve의 역할은 주파수를 정격주파수로 복귀시키는 동시에 primary reserve의 여유용량을 회복시킨다. 따라서 secondary와 primary reserve 간에는 상호 기능적 관계가 존재한다. 하지만 본 논문에서는 primary reserve의 경우 governor free에 의한 발전기 자동 출력 제어이기 때문에 primary 와 secondary

reserve간 상호관계를 통한 필요량을 결정하지 않는다.

### 2.3.3 Tertiary reserve control

Tertiary reserve는 secondary reserve의 양이 부족한 경우 SO가 새로운 예비력 발전원을 manual로 기동시킨다. 다만 off 되어 있는 발전원을 기동시키기 때문에 응답 시간이 secondary reserve 보다 느리고 tertiary reserve의 투입량은 secondary reserve의 잔여용량과 수급 불균형 상황에 따라 결정된다[4]. 이러한 tertiary reserve의 목적은 secondary reserve의 여유용량을 회복시키는 것이다. 즉, tertiary reserve가 투입이 되면 그 만큼의 secondary reserve 여유용량이 확대되기 때문에 secondary와 tertiary reserve 간에도 상호 기능적 관계가 성립된다. 본 논문에서는 tertiary reserve의 투입량과 투입시점, 최적 secondary reserve 필요량을 이 두 예비력의 상호관계를 통해 제시하고자 한다.

Tertiary reserve의 기준 실행기간(time scale)은 제어 예비력 중 보통 가장 길며, 그 기간은 5분에서 1시간까지로 다양하다. 일부 국가에서는 예비력의 응답시간, 실행가능시간에 따라 tertiary reserve를 세분화시키기도 한다. 예를 들어, 프랑스는 3차 예비력을 응답시간 기준에 따라 1) tertiary fast reserve(15분) 2) tertiary fast supplement reserve 3)postponed reserve로 세분화하여 분류하고 있다. 그러나 일반적으로 2차 제어가 응답 시간과

실행완료 시간이 명확하게 정의되어있는 것에 비해, 3차 제어는 그 기준들이 계통의 상황에 따라 다양하게 정의된다[23-24].

### 2.3.4 주파수제어예비력 역할 정의

본 논문에서 주파수제어예비력을 primary, secondary, tertiary reserve 로 분류를 하였고 각 예비력의 특징과 상호 기능적 관계에 대해서 논의하였다. 이러한 주파수제어예비력이 사고 상황이 발생하였을 경우 시간에 따라 어떻게 응답을 하는지 다음 그림 2.5로 설명할 수 있다[20].

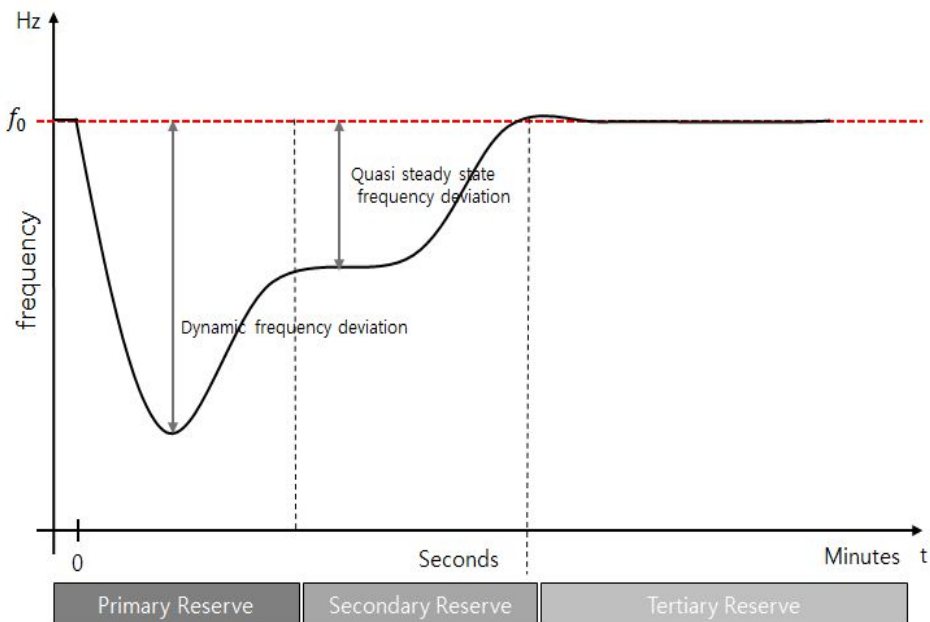


그림 2.5 주파수제어예비력 역할과 투입 절차



그림 2.5에서와 같이 발전기 탈락이나 수요가 크게 증가했을 경우 primary reserve가 즉각적으로 발전량을 증가시켜 주파수 탈락을 방지한다. 하지만 Primary reserve 출력량만으로는 정격 주파수로 안정적인 값으로 균형을 이루지 못하기 때문에 secondary reserve가 투입 되어 정격 주파수로 복귀시키며, primary reserve의 소모 용량을 사고 상황 전의 값으로 되돌린다. 만약 secondary reserve의 여유용량이 부족하게 될 경우 SO는 tertiary reserve를 투입하여 마찬가지로 secondary reserve의 소모 용량을 복구시킨다. 이와 같이 주파수제어예비력이 순차적으로 투입이 되고 예비력 간 상호 기능적 관계가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 주파수제어와 예비력 간의 용어적인 면에서 혼돈이 있을 수 있어 본 논문에서는 주파수제어예비력을 다음과 같이 정의하였다.

#### 1) Primary reserve

- Governor free에 의한 발전기 자체 출력을 조정하기 때문에 개개 발전기의 여유용량으로 정의[23-24]

#### 2) Secondary reserve

- 주파수 오차에 통해 여러 발전자원들로 구성된 시스템에서 필요한 발전량을 구한 뒤 개별 발전기들로 출력 배분을 하기 때문에 시스템에서의 여유용량을 정의[23-24]

### 3) Tertiary reserve

- Secondary reserve와 같이 시스템에서의 여유용량으로 생각할 수 있지만 주파수 오차에 의한 출력 배분으로 출력량이 결정되지 않고 SO manual로 기동시켜야하는 발전자원으로 정의[23-24]

## 2.4 전력시장 개념과 역할

전력시스템은 국가별로 지리적 특성에 따라 다른 특성을 지니고 있다. 미국이나 유럽의 경우 연계계통의 형태로 전력시스템이 구성되어 있는 반면 우리나라의 경우 단일계통으로 구성되었다. 따라서 전력시장 구조는 하나의 기준이 없고 각 국가 및 계통 운영 협의체별 특수성을 반영하여 개별적으로 발전해왔다[12][27].

전력은 저장이 불가능하고 실시간으로 수요와 공급이 일치해야하는 기본적인 특성 때문에 전력시장 구조는 다른 상품시장 보다 복잡한 형태를 가지고 있다. 따라서 전력시장에서는 실시간으로 수급균형 목표를 위해 다양한 서비스가 제공되고 있고, 각 서비스가 거래되고 실행되는 시점에 따라 시장이 분류 된다[12][27]. 본 연구에서는 경제성을 고려한 예비력운전을 위해 전력시장 구조에 대해서 설명을 하고, 예비력 시장이 어떻게 구성이 되는지에 대해서 정리하였다. 하지만, 본 연구에서는 실제 전력시장 운영을 그대로 적용하는 것은 한계가 있고, tertiary와 secondary reserve간의 가격 신호를 일차 함수를 근사화 하여 경제성을 평가하였다.

### 2.4.1 시점에 따른 시장 분류

SO는 수급균형을 위해 실시간으로 변화하는 전력수요, 공급변동, 기타 변수에 따라 발전기 출력 재조정, 송전선로의 조류량을 조정한다. 따라

서 이러한 수급균형을 위해 SO 우선적으로 수요를 예측하고 수요에 따른 필요한 예비력 용량을 결정한다. 그리고 시장을 통해서 에너지와 예비력 공급계획을 결정한다. 이 단계 까지는 계획 측면이고 보통 하루 전 시장 (Day ahead market)에서 이루어진다. 그리고 실시간 조정 시장(Real time balancing market)을 통해서 실시간으로 변화하는 수요에 따라 필요한 제어동작을 통해 예비력을 실행시킨다. 다음의 그림 2.6은 시간 흐름에 따른 전력시장 분류를 나타내었다[3-4],[15].

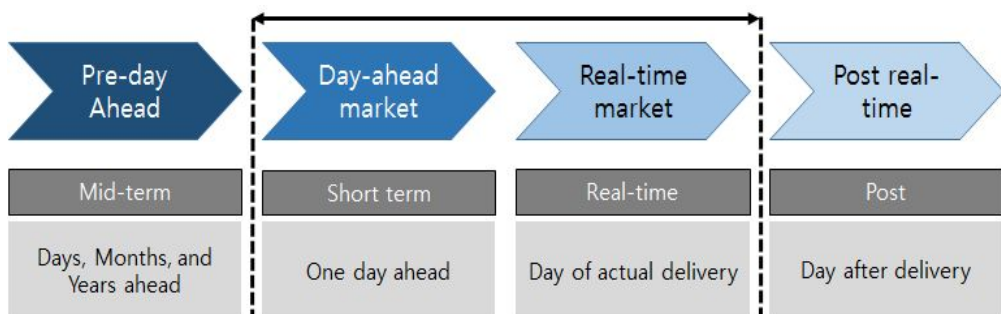


그림 2.6 시간 흐름에 따른 전력시장 분류

그림 2.6에서와 같이 우선 전력시장은 시간의 순서에 따라 수일 전 (pre-day ahead), 하루 전(day ahead), 실시간(real time), 실시간 이후 (post real-time)으로 분류된다. 수일 전은 수일 전(days-ahead), 수개월 전(months-ahead), 그리고 수년 전(years ahead)에서의 전력공급 계획 시점으로 구분된다. 하루 전은 운영일의 공급계획이 수립하는 시점이며, 실시간은 실제 계통운전 시 공급과 소비가 이루어지는 시점을 말한다. 그리고 실시간 이후는 SO가 실시간에 이루어졌던 수급상황 검토와 예비력 공

급의 보상이 이루어지는 시점을 의미한다. 일반적으로 예비력은 점선 내의 하루 전 시장과 실시간 시장에서 거래가 되기 때문에 본 논문에서는 이 두 종류 시장 구조에 대해서 알아보았다.

#### 2.4.1.1 하루 전 시장(Day ahead market)

하루 전 시장은 시장 참여자인 공급자와 소비자가 실제 운영일(Day) 하루 전에(D-1 day)에 에너지와 예비력을 계약하는 계획단계의 시장을 의미한다. 입찰은 두가지 형태로 나눌 수 있다. 첫 번째로 단순입찰인데 단순입찰은 입찰에 제약조건을 고려하지 않는 것이다. 두 번째로는 복합입찰인데 복합입찰은 최소발전량, 계획정지, 발전기 증감률 등을 입찰을 할 때 고려한다. 하루 전 시장에서 SO는 에너지와 운영예비력을 종합적으로 최적화하여 공급비용이 최소화되도록 계획한다[4].

SO는 하루 전 시장에 앞서서 수요를 예측하고 필요한 예비력 용량을 선정한다. 수요와 필요 예비력이 결정이 되면 안전도 제약 발전기 기동정지계획(security constrained unit commitment, SCUC)과 안전도 제약 경제급전(security constrained economic dispatch, SCED)을 통해 실제 계통 운영 날의 발전 계획과 예비력 용량 계획을 결정한다. 안전도 제약 경제급전을 통해서 참여자별 공급계획, 예비력 할당용량, 가격 정보가 결과 값으로 나오게 된다[4].

전 일 시장 참여자 중 공급자들은 정해진 시간에 우선적으로 입찰 (resource offers, resource parameters, physical schedules, demand bids)을 하며, SO는 공급자들의 입찰 정보를 토대로 다음 날(D day) 1 시간(혹은 30 분) 기준의 각 발전기의 발전량과 예비력 할당량을 안전도 제약 발전기 기동정지계획과 안전도 제약 경제급전을 통해 결정한다. 그리고 SO는 이 계획을 토대로 나온 가격을 공표하고 공급자들에게 공표된 가격을 기반으로 정산해 준다[4].

#### 2.4.1.2 실시간 조정 시장(Real time balancing market)

하루 전 시장은 전력 시스템 계획 측면을 고려하는 시장인 반면 실시간 조정 시장은 실시간으로 수급균형을 위한 전력 시스템 운영 측면을 고려한다. SO가 하루 전 시장에서 예측한 수요는 예측 값일 뿐 실제 운영상에서 수요 변동성이 존재한다. 따라서 실시간 시장에서는 계획된 발전량과 상황에 따라 예비력이 수행된다. 즉, SO는 시간대 별로 각 발전기의 발전량이 결정되었을 때, 미리 계획 된 예비력 자원을 실행하여 실시간 수급불균형을 해소시킨다[3-4],[15]. 수급불균형은 앞서 언급된 분류된 예비력 역할에 의해서 해소가 된다. 실시간 상황에서 수급불균형이 발생하면 즉각적으로 primary reserve가 실행되며, secondary reserve가 계통운영주기에 따라 자동적으로 정격 주파수를 유지하기 위해서 확보된 예비력

여유량을 각 발전기에 분배한다. 마지막으로 tertiary reserve는 secondary의 여유량 상태에 따라 SO의 판단으로 투입시점과 투입량이 결정된다.

## 2.5 9.15 정전사태의 시사점

2011년 9월 15일 수급균형을 위한 공급능력이 심각하게 떨어져서 전력거래소(KPX)에서 순환정전을 결정하였다. 전력거래소는 오전 10시 30분 경 예상 수요 증가를 감지하고, 예비 전력 생산을 위한 발전기 추가기동을 시작하였다. 그리고 자율절전과 부하제어를 통해 수요를 감소시켜 수급균형을 위해 노력을 하였다. 이러한 노력에 의해서 오후 2시 50분 경 부하는 감소하였고 예비력 부족 상황이 완화될 것이라고 생각을 하였다. 하지만 결국 예측된 수요에 비해 수요 변동성이 크게 증가하여 결국 오후 3시 10분부터 순환단전을 실시하여 전국적인 순환정전이 발생하였다. 다음의 그림 2.7은 9월 15일 주파수 현황을 나타내었다[4].

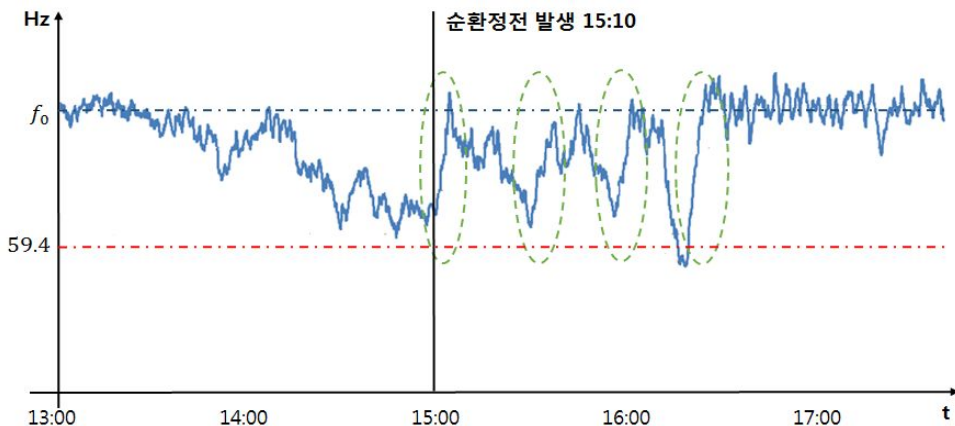


그림 2.7 9.15 정전사태 시 주파수 측정 결과



큰 수요 변동성 때문에 수요가 지속적으로 증가하게 되어 주파수는 지속적으로 하락을 하였고 주파수 하락을 방지하기 위해서 오후 3시경부터 순환단전을 수행하여 반복적으로 주파수가 회복되는 것을 확인할 수 있었다.

9월 15일 순환 정전의 주요 원인은 전력 수요의 예측 실패, 예비력 계획 및 운영의 미흡함이었으며, 이 정전사태 이후로 예비력 운영의 중요성이 증대되었다. 예비력 운영의 관점에서 관련 상황을 바라본다면, SO는 오전 10시경 당초 예측했던 수요보다 실제 수요가 더 높았지만 그 추세가 지속되지 않고 일시적이라고 판단하였다. 실제 수요가 9월 15일처럼 일시적이지 않고 지속적으로 큰 수요변동성을 야기한다고 해서 SO의 상황적 판단 오류가 있다고 보기에는 어렵다. 수요 예측은 과거 실적데이터, 현재 기온 뿐만 아니라 경제적인 부분까지 여러 복합 변수에 따라 도출되는 값이기 때문에 수요를 정확하게 예측하기는 힘들다 게다가, 산업고도화, 이상기온, 불확실성이 큰 신재생에너지원의 확대 연계에 따라 미래 전력계통 환경에서는 이러한 수요 예측 오차는 점점 더 커지게 될 것이며, 예비력운동을 이러한 수요 예측 오차를 해결하는 방향으로 접근해야 한다.

9.15 정전사태가 예비력 분류 및 정의 즉 예비력 운영 측면에 주는 시사점은 발전기 탈락, 송전 혼잡 등 계통 사고가 발생하지 않았는데도 불구하고 tertiary reserve가 필요하였고, 적정 시간에 기동이 되지 않아 수

급 불균형이 발생하였다는 사실이다. 다시 말해서 현 예비력 운영 지침과 실제 사용과는 불일치가 존재하며, 수요 변동성이 큰 경우와 같은 불확실성에 대처할 수 있는 체제로 개편될 필요가 있다. 따라서 tertiary와 secondary reserve 간에 사고/비사고 경계기준이 소멸되어야 하고 두 예비력 자원이 불확실성에 대처할 수 있게끔 tertiary reserve를 secondary reserve와 상호 협조할 수 있는 예비력 자원으로 수용성을 확대해야 한다.

본 논문에서는 tertiary reserve를 secondary reserve의 역할을 보완하는 예비력 자원으로 활용 폭을 넓힘으로써 경제적이고 안정적인 계통운동을 위한 예비력 운영 방법을 제시한다.

## 제 3 장 예비력 운영 관련 선행 연구

예비력운영 관련 연구는 주로 예비력 용량을 결정하는 문제로 진행되었다. 이러한 예비력 용량을 결정하는 문제는 기동정지계획(Unit Commitment, UC) 문제에서 제약조건으로 반영되거나 일부 목적함수로 적용이 되었다. 이러한 예비력 용량을 결정하는 문제는 결정론적 방법과 확률론적 방법 두 가지로 구분된다[9],[14-21]. 그리고 본 연구에서 제시하는 secondary와 tertiary reserve 간의 상호 기능적 관계를 이용하여 예비력 용량을 결정하는 연구는 ‘경쟁 시장에서의 적정 주파수제어예비력 용량 결정 방안 연구(A novel approach to determining reserve capacity requirement for frequency control in a competitive market environment)’가 있으며, 본 장에서는 본 연구의 선행 연구에 대해서 설명하였다.

### 3.1 예비력 운영 관련 연구 동향

예비력 운영 관련 연구는 앞서 언급하였듯이 예비력 용량을 결정하는 문제로 진행되었다. 예비력 용량을 결정하는 문제에 대해서 본 절에서는 결정론적 방법과 확률론적 방법에 대해서 설명하였다.

### 3.1.1 결정론적 예비력 용량 결정 방법

안정적인 전력계통 운영을 위해서 SO는 충분한 예비력을 확보해야 하며, 안정적인 계통 운영을 목표를 중요하게 생각하여 예비력 용량을 결정하는 방법이 결정론적 방법이다. 결정론적 방법은 계통에 사고를 대비하여 충분한 예비력을 필요한 예비력 용량으로 결정한다. 따라서 계통상에서 발생할 수 있는 사고인 발전기 탈락, 송전선 혼잡 등을 고려하여 필요량을 결정하고 현재까지도 대부분의 국가에서는 이 방법을 사용한다.

기존의 많은 선행 연구와 실제계통 운영에서는 결정론적 방법을 적용하여 전체 주파수제어예비력 용량 혹은 순동예비력 용량을 결정하였다. 우선 예비력 공급에 참여하는 공급자들의 순동 예비력 공급가능용량은 다음과 같다.

$$SR_i^t = \min \{ u_i (P_i^{\max} - P_{sch,i}^t), u_i^t (\tau SR_i^{up}) \} \quad (3.1)$$

여기서  $SR_i^t$ 는 시간  $t$ 에서 발전기  $i$ 의 순동예비력(Spinning reserve, SR) 가능량,  $P_i^{\max}$ 는 발전기  $i$ 의 최대용량,  $P_{sch,i}^t$ 는 발전기  $i$ 의 공급계획량,  $u_i^t$ 는 발전기  $i$ 의 기동( $i=1$ )과 정지( $i=0$ )를 나타내는 indicator

variable,  $\tau$ 는 순동예비력 실행 기준시간이다. 전체 예비력 공급 가능량은 필요한 예비력 용량보다 크거나 같아야 하는 제약조건은 다음의 식 (3.2)와 같다.

$$\sum_{i=1}^I SR_i^t \geq SR_d^t \quad (3.2)$$

여기서  $I$ 는 예비력 공급에 참여하는 전체 발전기의 수를 의미하며,  $SR_d^t$ 는 이때의 순동예비력 필요용량을 의미한다.

순동예비력 필요용량은 실시간 계통에서 발생할 수 있는 최대 상정사고의 크기로 정의되며, 식 (3.3)부터 식 (3.6)으로 4가지 종류로 정식화할 수 있다[4],[28-31].

$$SR_d^t = \max \{ u_i^t P_i^{\max} \} \quad (3.3)$$

$$SR_d^t = \max \{ u_i^t P_{sch,i}^t \} \quad (3.4)$$

$$SR_d^t = \max \{ u_i^t P_i^{\max}, \alpha_d P_d^{\max} \} \quad (3.5)$$

$$SR_d^t = \max \{ u_i^t P_i^{\max} \} + \beta_d P_d^{\max} \quad (3.6)$$

식 (3.3)은 순동예비력 필요용량을 계통에 연계한 가장 큰 발전기 용량으로 정의하였고 식 (3.4)는 발전계획량이 가장 큰 발전기의 해당 계획량을 순동예비력 필요용량으로 정의하였다. 여기서  $P_{sch,i}^t$ 는 발전기  $i$ 의 발전계획량을 의미한다. 식 (3.5)는 계통에 연계된 발전기의 최대크기와 계획기간 내 최대부하의 특정 비율 중 큰 값을 순동예비력의 필요용량으로 정의하였다. 여기서  $\alpha_d$ 는 첨두부하의 일정 비율을 의미하는 값이다. 식 (3.6)은 순동예비력 필요용량을 식 (3.5)의 구성요소의 합으로 결정하였다. 여기서  $\beta_d$ 는 기간 내 최대수요의 혼합비중이다. 캐나다의 Yukon 지역에서는  $\beta_d$ 의 값을 0.1로 설정하여 예비력 필요용량을 결정하기도 한다 [55].

결정론적 방법은 예비력 용량을 결정할 때 계통에 연계된 가장 용량이 큰 발전기를 고려한다. 즉, 가장 큰 용량의 발전기 1시가 갑자기 탈락하였을 때, 부하 차단이 발생하지 않게끔 예비력 용량을 산정한다. 그러나 발전기가 탈락할 확률은 매우 낮고 언제 발생할지 모르는 발전기 탈락에 대비해서 운영 기간 내내 이러한 예비력 용량을 확보하면 경제적으로 비효율적일 수 있다. 즉, 결정론적 방법은 전력계통의 특성, 부하 변동성과 불확실성, 기기 설비고장 등의 시스템 고유의 확률적이거나 통계적인 특

성을 반영하지 못하는 한계가 있다.

이러한 단점에도 불구하고 계통의 안정적인 운영과 예비력 용량 결정에 있어서 단순한 방법이기 때문에 여전히 많은 국가에서는 이러한 결정론적 방법을 통해 순동예비력, 즉 secondary reserve 필요량을 산정하고 있다[29-31].

표 3.1은 각 국가들의 secondary reserve 필요량을 결정하는 결정론적 방법을 나타내었다. Secondary reserve 필요량을 경험적인 데이터를 SO의 경험적인 data를 활용하거나 가장 큰 발전기 용량의 일정 비율로 산정하는 것을 확인할 수 있다[4]. 하지만 primary와 tertiary reserve의 경우 필요한 용량이 구체적으로 언급이 되지 않은 경우가 많고, secondary와 tertiary reserve의 구분 기준이 모호하다. 일반적으로 예비력 운영 시 SO는 충분한 secondary reserve의 용량을 확보하여 tertiary reserve의 사용빈도가 거의 없게끔 운영을 하고 있다. 그러나 본 논문에서는 적정 secondary reserve 필요량을 확보하고 tertiary reserve를 활용을 확대하는 예비력 운영 방법으로 제시한다.

표 3.1 국가 별 예비력 필요용량 결정 방법

계통 운영자	국가	주파수제어 예비력		
		Primary reserve	Secondary reserve	Tertiary reserve

UCTE	유럽	3,000[MW]	$\sqrt{10P_d^{\max} + 150^2} - 150$	2차 예비력보다 크거나 동일한 크기
PJM (Western)	미국	시간대에 따라 상이함	$1.5\%P_d^{\max}$	시간대에 따라 상이함
PJM (Southern)	미국	시간대에 따라 상이함	$\max(u_i^t P_i^{\max})$	시간대에 따라 상이함
PJM (Other)	미국	시간대에 따라 상이함	$1.1\%P_d^{\max}$	시간대에 따라 상이함
NGET	영국	250[MW]	2,255[MW]	
ELIA	벨기에	100[MW]	$\sqrt{10P_d^{\max} + 150^2} - 150$	발전기:460 [MW] 부하: 200[MW]
VDN	독일	기준사고 적용	시간대에 따라 상이함	시간대에 따라 상이함
RTE	프랑스	700[MW]	$\max(500, \sqrt{10P_d^{\max} + 150^2} - 150)$	시간대에 따라 상이함
TenneT	네덜 란드	100[MW]	$\sqrt{10P_d^{\max} + 150^2} - 150$	300[MW]
REE	스페인	발전기 설비용량 의 1.5%	빠른 부하: $6\sqrt{P_d^{\max}}$ 느린 부하: $3\sqrt{P_d^{\max}}$	최대 발전기 용량+예측 부하2%

### 3.1.2 확률론적 예비력 용량 결정 방법



앞 절에서는 예비력 필요용량을 결정하는 결정론적 방법에 대해서 설명하였다. 하지만 결정론적 방법은 경제성 면에서 효율성이 떨어지는 측면이 있고, 예비력 용량을 결정할 때 수요와 같은 변수들의 특성을 반영하지 못하는 단점이 있었다. 이러한 단점을 보완하기 위한 예비력 용량 결정 방법이 확률론적 방법이며 확률론적 방법은 전력시스템의 기기들의 위험정도를 확률 지표 등으로 표현하여, 예비력 필요용량 결정의 주요 제약조건으로 사용하는 방법을 의미한다. 1930년대부터 계통의 확률론적 특성을 고려하여 계통 신뢰도를 정의하고, 이러한 신뢰도 값을 토대로 예비력 필요용량을 결정하는 방법이 필요하다고 생각하였다. 그 결과 1963년 PJM에서 예비력 필요용량의 적정성을 평가하는 확률론적 방법을 제안하였으며 다음의 식 (3.7)과 같이 나타낼 수 있다[4],[32].

$$\Pr_C = \sum \Pr(P_g^t \leq P_d^t) \quad (3.7)$$

식 (3.7)에서  $\Pr_C$ 는 공급( $P_g^t$ )가 수요( $P_d^t$ )보다 작거나 같은 공급지장 확률의 합이다. 예비력의 적정성을 평가하는데 있어 공급지장 확률의 개념을 처음으로 도입하였다. 다음은 예비력 평가지표를 기동정지계획 위험도 ( $UC_{risk}$ , unit commitment risk)로 정의하면 식 (3.8)과 같다[33]. 여기서  $UC_{risk}$ 는 부하차단이 발생할 확률을 의미한다.

$$UC_{risk} = \Pr\left[\sum_{i=1}^N (P_i^t + SR_i^t) \leq P_d^t\right] \quad (3.8)$$

예비력 용량을 산정하는데 있어서 산정된 예비력 용량의 적정성을 판별해야 한다. 이러한 예비력 적정성을 판별하는 기준을 공급지장확률(loss of load probability, LOLP)로 정의하였다. 즉, 실시간 계통에서 예비력 부족으로 공급지장이 발생할 확률을 지수함수를 사용하여 나타낸 후 이를 예비력 공급의 적정성을 판단하는 함수로 나타냈다[33]. 공급지장확률을 정의하기 위해서 먼저 공급지장이 발생할 확률을 다음의 식 (3.9)와 같이 나타내었다.

$$\Pr_P = c_0 e^{-P/K} \quad (3.9)$$

여기서  $\Pr_P$ 는  $P$ [MW]이상의 부하차단이 발생할 누적확률을 의미하며,  $c_0$ ,  $K$ 는 경험에 의해 산출되는 확률분포 상수이다. 공급지장확률 함수는 식 (3.9)을 통해서 식 (3.11)로 얻어질 수 있다.

$$\ln \Pr_P = \ln c_0 - P/K = C_o - P/K \quad (3.10)$$

$$f(LOLP) = K[\ln c_0 - \ln(LOLP)] \quad (3.11)$$

이 때, 순동예비력의 필요용량의 제약조건을 확률적으로 정의된 공급지장의 크기보다 같거나 커야한다.

$$\sum_{i=1}^I SR_i^t \geq f(LOLP_o), \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (3.12)$$

이러한 접근방법은 예비력 필요용량의 적정여부를 공급지장 확률 또는 함수를 통해 평가한다. 그러나 이러한 지표는 정확히 예비력 필요용량이 얼마만큼 요구되는지를 정량적으로 제시하지는 못한다. 따라서 위의 지표들을 기준으로 고려해서 예비력 필요용량을 최적화시키는 과정은 우선 공급지장 확률을 기동정지계획 문제 내부의 수식으로 표현한다.

$$LOLP = \Pr\left[\sum_{i=1}^I m_i^t (P_{sch,i}^t + SR_i^t) \leq P_d^t\right] \quad (3.13)$$

수식 (3.13)은 순동예비력과 발전계획량을 고려했을 때의 LOLP를 나타낸다. 여기서  $m_i$ 는 발전기  $i$ 가 계통상에 연계되었을 때 공급가능여부를 나타내는

지표이다. ( $m_i = 0$ :공급중지,  $m_i = 1$ :공급) 발전기 1기가 탈락했을 때를 기준으로 했을 때의 부하차단 여부를 판단하는 지표( $\sigma_j$ )는 다음과 같다[33].

$$\frac{P_d - \sum_{i \neq j}^n (P_{sch,i} + SR_i)}{\sum_{i=1}^n P_i^{\max}} \leq \sigma_j \leq 1 + \frac{P_d - \sum_{i \neq j}^n (P_{sch,i} + SR_i)}{\sum_{i=1}^n P_i^{\max}} \quad (3.14)$$

식 (3.14)를 발전기 2개가 탈락했을 때로 확장했을 때 수식은 다음과 같다.

$$\frac{P_d - \sum_{i \neq j,k}^n (P_{sch,i} + SR_i)}{\sum_{i=1}^n P_i^{\max}} \leq \sigma_{jk} \leq 1 + \frac{P_d - \sum_{i \neq j,k}^n (P_{sch,i} + SR_i)}{\sum_{i=1}^n P_i^{\max}} \quad (3.15)$$

기동정지 계획문제로 내제화된 LOLP는 수식 (3.15)를 반영하여 다음의 다항식으로 표현할 수 있다. 이 때 복수의 발전기의 탈락 가능성을 고려하였다.

$$LOLP = \sum_{j=1}^I \sigma_j \Pr_j^1 + \sum_{j=1}^I \sum_{k>j}^I \sigma_{jk} \Pr_{jk}^2 + \dots \quad (3.16)$$

여기서  $Pr_j$ 는 발전기  $j$ 가 탈락하였을 때 공급지장이 발생할 확률이다. 공급지장전력량 기대값(expected energy not supplied, EENS)은 수식 (3.17)를 통해 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 EENS = & \sum_{j=1}^I \sigma_j Pr_j^1 (P_{sch,j} + SR_j - SR_d) \\
 & + \sum_{j=1}^I \sum_{k>j}^I \sigma_{jk} Pr_{jk}^2 (P_{sch,j} + SR_j + P_{sch,k} + SR_k - SR_d) + \dots
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

여기서  $P_{sch,j}$ 는 발전기  $j$ 의 탈락으로 공급이 불가능한 계획된 에너지 즉,  $j$ 의 탈락으로 발생하는 공급지장 에너지이고  $SR_j$ 는 발전기  $j$ 의 탈락으로 공급이 불가능한 순동예비력을 의미한다. SO가 목표하는 LOLP 또는 EENS 값을 설정하여 순동예비력 필요용량을 결정한다.

확률론적으로 고려된 지표를 고려하여, 예비력 필요용량은 예비력을 포함한 에너지 공급 비용과 부하차단 시 발생하는 손실비용 기대값의 합으로 정의되는 사회적 비용을 최소화시키는 목적함수를 통해 최적 값이 결정된다[33].

$$\min_{SR_d} \{ \Gamma(SR_d) = \Pi(SR_d) + E(SR_d) \} \tag{3.18}$$

여기서  $\Gamma(SR_d)$ 는 사회적비용,  $\Pi(SR_d)$ 는 에너지 및 순동예비력 공급비

용,  $E(SR_d)$ 는 부하차단비용 기대값이다. 우선 에너지 및 순동예비력 공급 비용( $\Pi(SR_d)$ )는 기동정지계획의 문제로서 정식화된다.

$$\Pi(SR_d) = \min \left\{ \sum_{i=1}^I (\lambda_{P_{sch,i}} P_i + \lambda_{SR,i} SR_i) u_i \right\} \quad (3.19)$$

여기서  $I$ 는 발전기의 수,  $\lambda_{P_{sch,i}}$ 는 발전기  $i$ 의  $P_{sch,i}$ [MWh] 에너지 공급에 대한 가격,  $\lambda_{SR,i}$ 는 순동예비력 공급 가격이다. 우선 주어진 발전계획량  $P_{sch}$ 와 예비력 필요용량  $SR_d$ 이 주어진 상태에서 기동정지계획이 결정되면, 공급지장비용의 기대값이 계산된다. 공급지장비용 기대값은 보통 공급지장비용(value of lost load, VOLL)과 EENS의 곱으로 정의된다.

$$E(SR_d) = VOLL(SR_d) \cdot EENS(SR_d) \quad (3.20)$$

순동예비력의 최적용량은 순동예비력 용량을 추가로 확보할 때 필요한 비용이 공급지장비용의 감소치보다 크거나 같을 조건을 만족할 때까지의 값이다.

$$E(SR_d) - E(SR_d + \Delta SR_d) \geq \Pi(SR_d + \Delta SR_d) - \Pi(SR_d) \quad (3.21)$$

수식 (3.21)은 다음의 미분 형태의 필요조건으로 표현할 수 있다. 이 필요조건이 만족할 때까지 재귀적 방법을 통해 순동예비력 필요용량을 최적화시킨다.

$$\frac{\Delta E(SR_d)}{\Delta SR_d} + \frac{\Delta \Pi(SR_d)}{\Delta SR_d} = 0 \quad (3.22)$$

## 3.2 예비력 간의 상호 기능적 관계를 고려한 용량 결정

예비력 필요용량을 결정하는 결정론적 방법과 확률론적 방법은 본 논문에서 제시하려고 하는 예비력 간의 상호 기능적 관계를 고려하지 않았다. 단순히 수요 변동성을 고려하여 secondary reserve 용량과 발전기 사고를 대비한 tertiary reserve 용량을 분리하여 예비력 용량을 결정하였다. 하지만 이 두 예비력 간에는 앞서 언급하였듯이 역할 측면에서 상호 기능적 관계가 존재하며, 2011년 9.15 정전사태와 같이 두 예비력을 분리하여 운영하는 것은 수요 변동성이 큰 전력계통 환경에는 적절한 운영 방법이 아니었다.

본 절에서는 예비력 간의 상호 기능적 연관성을 고려한 예비력 용량 결정 방법을 제시한 ‘경쟁 시장에서의 적정 주파수제어예비력 용량 결정 방안 연구(A novel approach to determining reserve capacity requirement for frequency control in a competitive market environment)’에 대해서 소개를 하였다. 그리고 선행 연구의 한계점을 분석하고 본 논문에서 제시한 방법과의 차이점에 대해서 설명하였다.

### 3.2.1 선행 연구의 주요 내용

선행 연구는 실시간 수급균형을 유지하는데 활용되는 주파수제어예비



력을 기능적, 경제적 상호관계를 고려하여 필요용량을 제시한다는 점에서 본 논문과 유사하다. 하지만 기존 논문은 secondary reserve의 필요용량을 결정하는 계획 측면만을 다루었고 실제 secondary와 tertiary reserve의 출력 특성을 고려한 운영 측면은 고려하지 않았다. 다시 말해서, secondary와 tertiary reserve 간에는 발전량 출력 속도가 차이가 발생하는데 선행 연구에서는 secondary와 tertiary reserve 출력을 step function으로 가정하여 두 예비력 간 출력 특성 차이가 존재하지 않는다. 다음의 그림 3.1은 선행 연구에서 수요 imbalance가 발생하였을 때 secondary와 tertiary reserve가 운영되는 방법을 나타냈다[4].

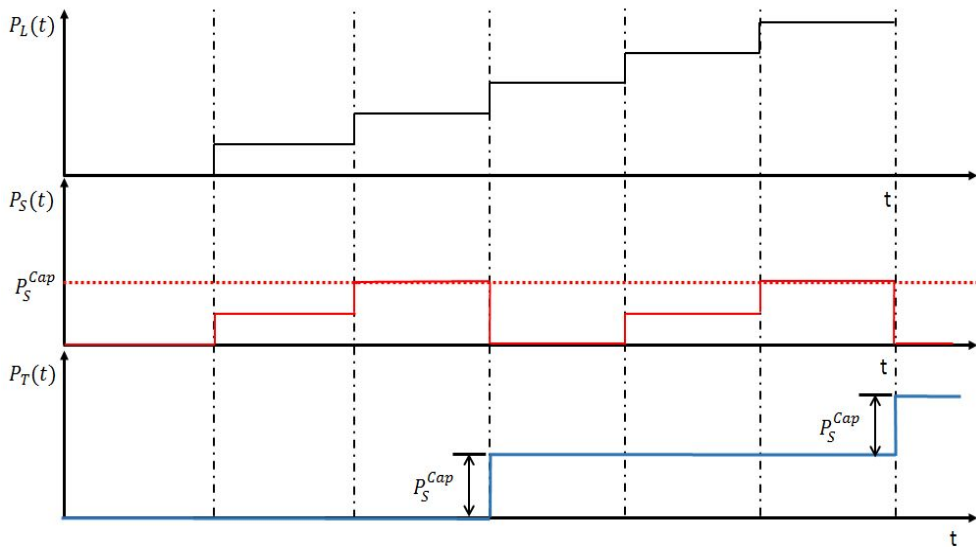


그림 3.1 선행연구의 예비력 운영 방법

그림 3.1과 같이 수요 imbalance가 발생하면 우선적으로 secondary reserve가 투입이 되고, 만약 secondary reserve 용량이 1(MW)라고 가정하고 수요 imbalance가 1(MW)만큼 발생하였을 때 tertiary reserve가 step function으로 secondary reserve 용량만큼 출력을 낸다. Tertiary reserve가 출력을 낸 만큼, 즉 tertiary reserve는 secondary reserve 용량만큼 출력을 냈으므로 secondary reserve 출력은 0으로 되며 1만큼의 여유용량이 생긴다. 이러한 방법으로 secondary와 tertiary reserve간의 상호 기능적 연관성을 고려하여 예비력 운영을 한다. 이러한 예비력 운영으로 secondary reserve의 용량을 실시간 수요 imbalance에 따라 산정하는 것이 선행연구의 최종 목표이다. 하지만 tertiary reserve가 시지연(time delay)이 없다고 가정하여 step function으로 출력 되어 secondary와의 출력 특성 면에서 차별성이 없는 점이 예비력 운영 측면에서 다소 현실성이 없다. 따라서 선행 연구는 앞서 언급하였듯이 운영 측면 보다는 secondary reserve 용량을 산정하는 계획 측면에 더 가깝다고 할 수 있다.

### 3.2.2 선행 연구의 한계점

선행 연구의 연구 목표와 본 연구의 목표가 유사하다고 앞서 언급하였다. 하지만 본 연구에서는 선행 연구에서 고려하지 않은 부분들을 분석

하고 그에 따른 예비력 운영상의 결과가 어떻게 달라지는지 설명하였다. 본 절에서는 선행 연구의 한계점에 대해서 언급을 하고 본 연구와의 차이점을 설명하였다.

### 3.2.2.1 주파수를 고려하지 않은 예비력 운영

예비력을 주파수제어예비력이라고 용어를 정한 이유는 앞 서 언급하였듯이 SO는 실시간으로 부하와 공급량 data를 획득하지 못하고, 수급불균형이 발생하는 주파수 오차에 따라 예비력 운영을 하기 때문이다. 따라서 예비력 운영에서 주파수를 고려하는 것은 필수적이다. 하지만 선행연구에서는 단순히 수요 imbalance 크기만큼 secondary와 tertiary reserve 출력량을 결정하였다. 전체공급과 수요가 일치하지 않으면, 부하 자체에서 주파수 변동을 억제하려는 damping 현상이 일어난다. 동기 모터(synchronous motor)와 같이 주파수 변화에 민감한 부하들이 주파수 변동에 따라서 그 부하의 크기 역시 변하는 것을 의미한다. 다음의 식(3.23)은 수요 imbalance( $\Delta P_L$ ), 발전기의 출력변화량( $\Delta P_G$ )과 수요 damping 현상에 따른 변화( $\Delta P_D$ )를 나타내었다.  $R$ 은 발전기 droop 특성 계수이고  $D$ 는 damping 계수를 의미한다[20],[22].

$$\Delta P_L = \Delta P_G - \Delta P_D = \left(-\frac{1}{R} - D\right) \Delta f_{ss} = -\beta \Delta f_{ss} \quad (3.23)$$

수요 damping 크기에 따라 주파수 오차가 변화할 수 있으며, 그에 따라 primary와 secondary reserve의 출력량이 변한다. 이러한 이유로 단순히 수요 imbalance에 크기만을 고려하여 예비력 운영하는 데에는 최적 예비력 필요용량을 구하는데 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 primary reserve 출력량을 결정하는 발전기 모델링과 secondary reserve 출력량을 결정하는 주파수제어 시스템 모델링을 하였다.

### 3.2.2.2 시지연을 고려하지 않은 tertiary reserve 출력 특성

Tertiary reserve의 출력이 선행연구에서는 step function으로 가정을 하였다. 이렇게 가정을 했을 경우 예비력 운영 측면에서 secondary reserve와 출력 특성 면에서 차이가 없다. 일반적으로 tertiary reserve 응답속도가 secondary reserve보다 느리기 때문에 가격 측면에서도 tertiary reserve가 secondary reserve보다 낮게 책정이 된다. 그런데 만약 출력 특성이 없다면 가격이 낮은 tertiary reserve 만으로 예비력을 자원을 구성해도 계통 운영상에는 문제가 없을 것이다. 선행 연구에서도 이러한 부분 때문에 secondary reserve가 우선적으로 투입이 되고 이 예비력 여유용량이 없을 경우 tertiary reserve가 기동이 되는 형태로 예비력 운영을 순차

적으로 적용하였다. 이와 같이 순차적으로 예비력을 투입했을 경우 예비력 운영상의 계획 측면에서 secondary reserve 용량을 결정하는 것은 의미가 있다. 하지만 tertiary reserve를 언제, 얼마만큼 투입할 것인지에 대한 예비력 운영은 tertiary reserve가 step function 출력 특성을 지니기 때문에 선행연구로는 한계가 있다. 선행연구를 보완하여 본 연구에서는 시지연을 고려한 tertiary reserve 출력 특성을 고려하여 tertiary와 secondary reserve와 출력 응답 속도 측면에서 차별성을 고려하였다. 따라서 tertiary reserve의 적정 투입량과 투입시기를 결정함으로써 최적 secondary reserve 필요량을 동시에 구하는 최적 예비력 운영 방법을 제안한다.

### 3.2.2.3 Tertiary reserve 출력 특성 제약

선행연구에서 적정 secondary reserve 필요용량을 구하는 최적화 과정에서 tertiary reserve의 투입량을 secondary reserve 필요용량 값만큼 가정하였다. 다음 그림 3.1에서와 같이 tertiary reserve는 secondary reserve 필요용량이 1일 경우 1만큼 투입량이 결정되었다. Tertiary reserve 투입량을 선행연구와 같은 방법으로 가정을 한다면 secondary reserve 용량 최적 값이 실제 최적 해와 오차가 발생할 가능성이 존재한다. 따라서 선행연구에서는 tertiary reserve 출력 특성을 가정함으로써

secondary reserve와 기능적 상호관계를 증명하는 데에는 의의가 있지만 최적 해를 구하는데에는 한계가 있다. 하지만 본 연구에서는 secondary reserve 필요용량과 상관없이 tertiary reserve의 적정 투입량을 결정함으로써 선행연구를 보완하였다.

## 제 4 장 주파수제어예비력 모델링

주파수제어예비력은 전력계통의 주파수를 유지하기 위한 제어구조로 이루어져 있다. 즉, 수요 imbalance가 발생하였을 때 주파수가 변화하게 되고 그 주파수 오차 값을 토대로 SO가 예비력 발전기들의 출력량을 제어한다. 다음의 그림 4.1에서 보여주듯이 시간에 따라 수요 imbalance가 발생하고 그로 인해 주파수가 변화하는 dynamic system에서 SO는 정격 주파수 오차 범위내로 유지시키기 위한 feedback control을 수행한다. 이 feedback control 이라는 것이 본 연구에서 하는 예비력 운영이며 primary, secondary, tertiary reserve control이다. 따라서 본 장에서는 각 예비력의 출력 특성을 수학적으로 모델링하고, 특히 시지연을 고려한 tertiary reserve 출력 특성을 중점적으로 설명하였다.

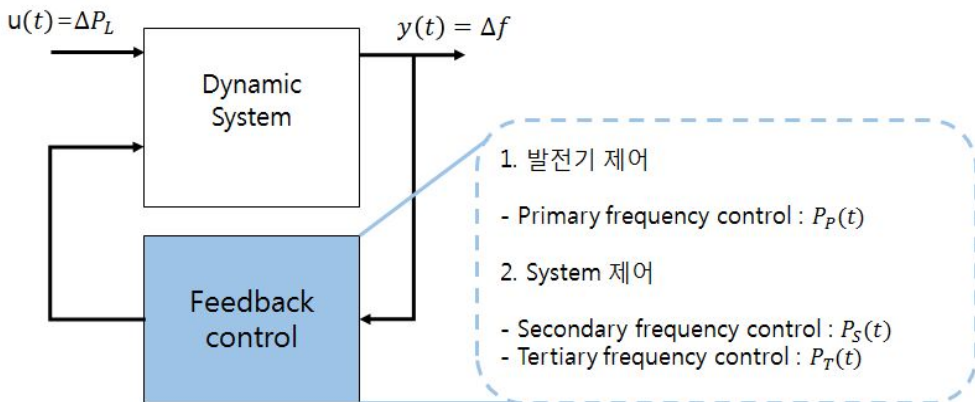


그림 4.1 주파수제어예비력의 역할

## 4.1 Primary reserve 모델링

Primary reserve는 주파수 오차가 발생하였을 때 governor control에 의해서 동작을 한다. Primary reserve는 예비력인데 주파수제어라는 용어를 사용하는데서 혼돈이 올 수 있다. 따라서 primary reserve는 발전기가 현재 출력하고 있는 발전량과 최대 출력량과의 차이, 즉 발전기 여유용량이라고 본 연구에서 정의하였다. 이러한 primary reserve의 출력량( $P_p(t)$ )를 수학적으로 모델링하기 위해서는 그림 4.2의 발전기 모델링을 통해서 가능하다. 주파수 오차( $\Delta f$ )가 droop 특성( $R$ )에 의해서 필요한 발전량으로 변환 되어 valve position을 제어하는 governor control 입력 값으로 결정된다. 이러한 발전기 모델을 통해서 primary reserve 출력을 정의하면 다음의 식 (4.1)과 같다[20],[22].

$$P_p(s) = [RS - \frac{\Delta f(s)}{R}] G(s) \quad (4.1)$$

$$G(s) = \frac{1}{T_g s + 1} \frac{1}{T_{ch} s + 1} \quad (4.2)$$



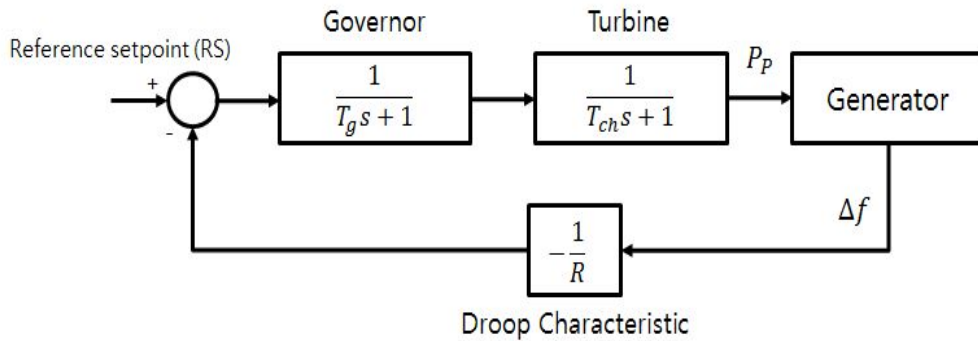


그림 4.2 Primary reserve 모델링

## 4.2 Secondary reserve 모델링

Secondary reserve는 그림 4.1에서 reference setpoint 값을 의미한다. Primary reserve가 발전기의 여유용량으로 정의를 하면, secondary reserve는 다수의 발전기들로 구성된 시스템 상에서의 여유용량으로 정의할 수 있다. 이러한 secondary reserve 또한 주파수 오차에 의해서 출력량이 결정이 되며 본 연구에서는 단일계통만을 고려하기 때문에 지역제어 오차(area control error, ACE)는 고려하지 않는다. 따라서 주파수 오차 값만으로 각 발전기의 reference setpoint를 결정함으로 다음의 식 (4.3)과 같이 수학적으로 모델링 할 수 있다. 주파수 변화( $\Delta f$ )를 bias factor( $\beta$ )를 통해서 필요한 발전량으로 변환하고, 이 값을 누적하여 발전기 reference setpoint를 결정한다. 실 계통에서는 그림 4.3과 같이 시스템 내 여러 개의 발전기가 구성되어 있어서 경제급전을 위한 generation allocation과정

을 통해 각 발전기로 분배가 되는 형태로 reference setpoint가 결정이 된다. 하지만 본 연구에서는 전체 시스템 상에서의 secondary reserve 필요 용량을 구하기 때문에 generation allocation은 적용하지 않았다.

$$P_S(s) = -K \frac{\beta}{s} \Delta f(s) \quad (4.3)$$

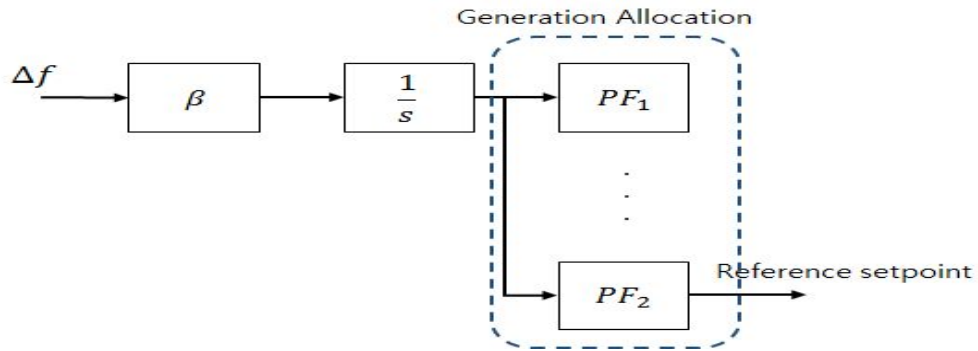


그림 4.3 Secondary reserve 모델링

### 4.3 Swing equation

Primary와 secondary reserve에서 주파수 오차 입력 값을 기준으로 출력량을 결정하였다. 따라서 주파수 오차 또한 수학적으로 모델링을 해야 하며 다음의 식 (4.4)의 swing equation을 통해서 주파수 오차를 정의할 수 있다. 터빈의 출력인 Mechanical power와 발전기의 출력인

electrical power 간의 차이에 의해서 주파수 오차가 발생하며 터빈-발전기 모두 회전 운동에너지를 가지고 있기 때문에 회전 관성( $M$ ) 특성이 존재한다. 식 (4.4)는 그림 4.5의 블럭 선도로 표현 가능하다[20],[22].

$$\Delta P_M - \Delta P_E = w_0 I \frac{d}{dt} \Delta w$$

$$\Delta P_M - \Delta P_E = M_1 s \Delta w \quad (4.4)$$

where,

$$M = wI$$

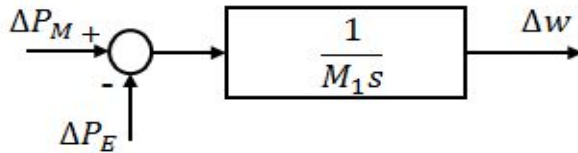


그림 4.4 Swing equation (1)

발전기의 electrical power는 다음의 그림 4.5와 같이 시스템 부하와 동기화 되어 있다. 그리고 electrical power는 식 (4.5)와 같이 주파수 변화에 민감한 동기 모터(synchronous motor)( $P_L(w)$ )와 같은 부하와 일반 부하( $P_L$ )로 나눌 수 있다.

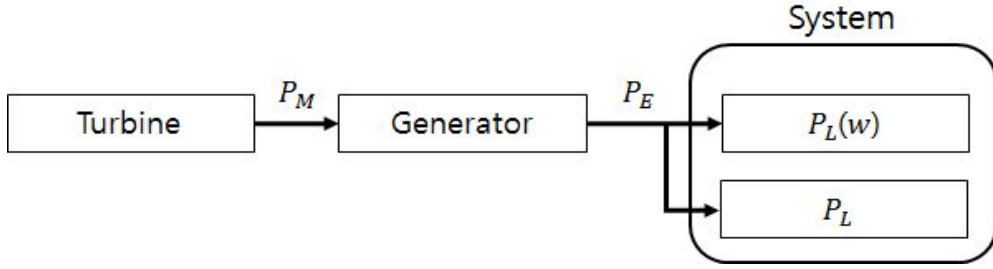


그림 4.5 Electrical power와 sync system 부하

$$\Delta P_E = \Delta P_L(\Delta w) + \Delta P_L \quad (4.5)$$

$$\Delta P_L(\Delta w) = M_2 \frac{d}{dt} \Delta w \quad (4.6)$$

$$\Delta P_E = M_2 s w + \Delta P_L \quad (4.7)$$

$$\Delta P_M - \Delta P_L = (M_1 + M_2) s \Delta w \quad (4.8)$$

주파수 변화에 민감한 부하는 식 (4.6)과 같이 표현되어 최종적으로 식 (4.8)로 정리하였다. 그림 4.4와 식 (4.7)과 식 (4.8)을 블록선도로 표현하면 각각 그림 4.6과 4.7로 표현하였다[20],[22].

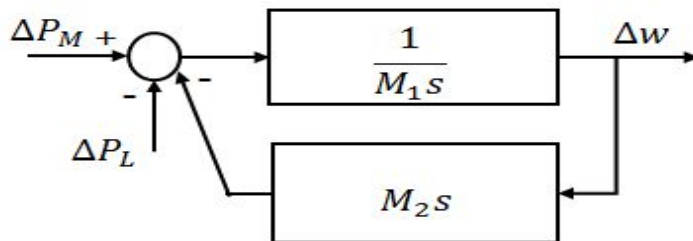


그림 4.6 Swing equation (2)

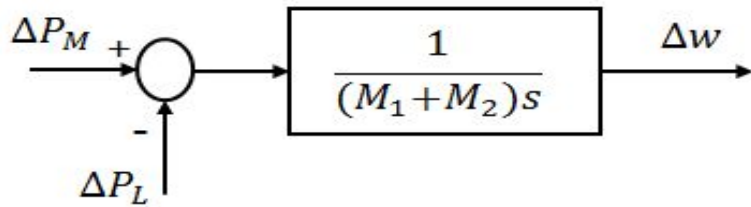


그림 4.7 Swing equation (3)

이와 같이 swing equation으로 주파수 변화를 수학적으로 정의하였고 이에 앞서 주파수 변화량에 따라 출력량이 변화하는 primary와 secondary reserve를 수식화 하였다. 따라서 tertiary reserve를 제외한 주파수 변화에 따라 출력이 결정되는 두 예비력을 본 연구에서는 그림 4.8과 같이 모델링을 하였다. 그리고 그림 4.9는 수요가 step으로 변화할 때의 주파수 변화와 그에 따른 primary와 secondary 출력 변화를 나타냈다.

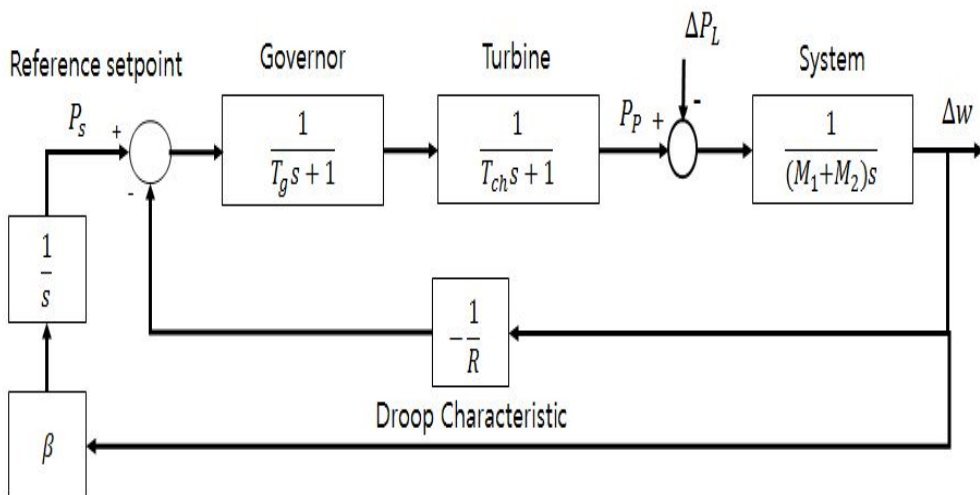


그림 4.8 주파수제어예비력 출력 모델링

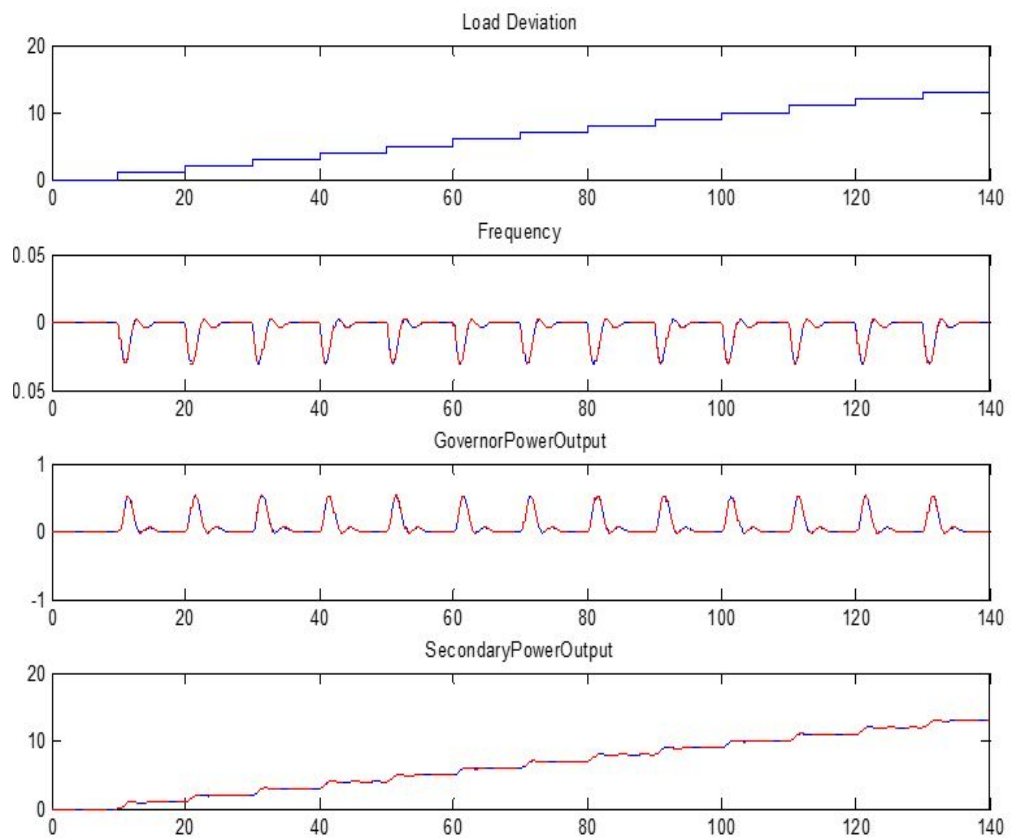


그림 4.9 수요변동에 따른 primary와 secondary reserve 출력

## 4.4 Tertiary reserve 모델링

지금까지 primary와 secondary reserve의 출력 모델링을 하였다. 두 예비력은 주파수 오차에 의해서 출력량이 결정되기 때문에 swing equation을 통한 주파수 모델링이 필요하였다. 하지만 tertiary reserve의 경우 SO가 manual로 해당 예비력 발전원을 기동시키기 때문에 tertiary reserve 출력을 모델링 하는데 주파수 모델링이 직접적으로 필요하지 않는다. 다만 전체 예비력 운영 측면에서 tertiary reserve가 수요 imbalance에 반하는 방향으로 출력량이 결정되기 때문에 간접적으로 주파수 오차 결과에 영향을 미친다. 본 절에서는 이러한 tertiary reserve 출력을 본 연구에서 제안하고자 하는 예비력 운영 방법을 적용할 수 있도록 수학적 모델링을 하였다.

### 4.4.1 Tertiary reserve의 출력 형태 및 전제 조건

선행연구에서 tertiary reserve는 step function으로 가정을 하였지만 본 연구에서는 time delay를 고려하여 다음 그림 4.10과 같이 모델링을 하였다. 그림에서와 같이 tertiary reserve time delay는  $t_d$ ,  $t_{r-up}$  과  $t_{r-dn}$ 를 고려한다.  $t_d$ 는 SO가 tertiary reserve를 기동했을 때부터 실제 출력이 발생하기 까지를 의미하는 cold startup time 이다. 그리고  $t_{r-up}$ 과  $t_{r-dn}$

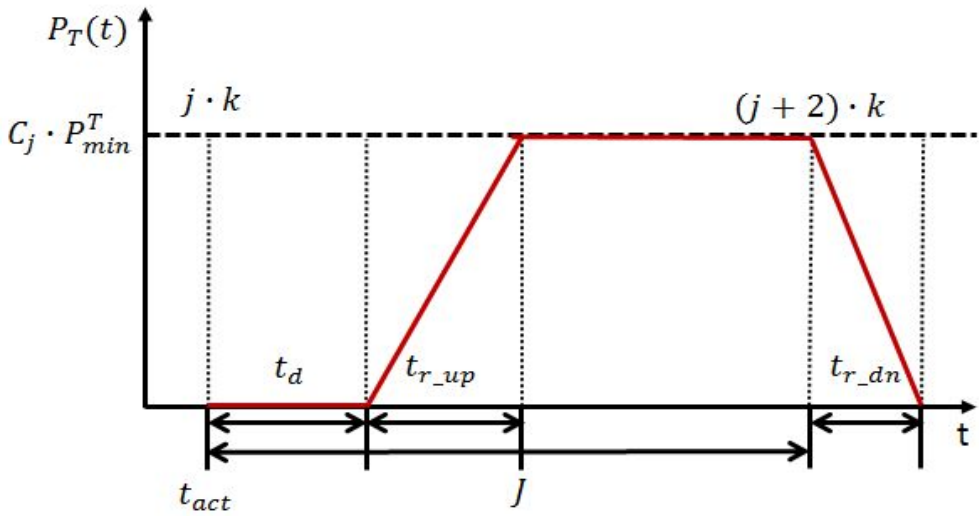


그림 4.10 Tertiary reserve 출력

는 cold startup time 이후 SO가 목표하는 출력까지의 ramp up time과 ramp down time을 의미한다.  $j$ 는 tertiary reserve 투입 시점 주기의 index 이며  $k$ 는 투입 결정 주기를 의미한다. 본 연구에서는  $k=15$ 분으로 가정을 하였다. 그리고  $J$ 는 tertiary reserve가 기동된 이후 의무적으로 계통 연계가 되는 기간인 minimum up time 제약조건이며, 본 연구에서는 30분으로 정의하였다. 즉, 즉,  $jk$ 시점에서 tertiary reserve를 기동했다면  $J$ 기간( $(j+2)k$ ) 동안 발전기가 투입되어야 한다. 다음의 표 4.1은 tertiary reserve 출력 특성을 모델링하기 위해서 본 연구에서 정의한 파라미터를 정리하였다.



표 4.1 Tertiary reserve 출력을 결정하는 파라미터

	내용
$j$	Tertiary reserve 투입 주기 index
$k$	Tertiary reserve 투입 결정 주기
$C_j$	j번째 주기에서 tertiary reserve 투입량
$t_d$	Cold start time delay
$t_{r\_up}$	Ramp up time
$t_{r\_dn}$	Ramp down time
$t_{act}$	Activate time
$J$	발전기 최소 투입 기간

#### 4.4.2 Tertiary reserve 출력 증가 부분

Tertiary reserve 출력이 시지연과 의무적으로 계통연계가 되어야 하기 때문에  $jk$ 시점에 기동이 되어도  $(j+1)k$ ,  $(j+2)k$  시점에 이전에 기동된 출력량이 영향을 준다. 마찬가지로 ramp down time delay로 인해서 출력량이 step으로 감소하지 않기 때문에 출력 감소부분도 다른 시점에 영향을 준다. 따라서 현재 시점에서 tertiary reserve가 기동이 되어도 이전 시점에서 기동된 발전량을 고려해야 한다는 점에서 tertiary reserve의 출력량을 모델링하기가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 tertiary reserve를 출력이 증가하는 부분과 감소하는 부분으로 나누어서 모델링을 하였다. 다음의 식 (4.9)는 tertiary reserve를 출력을 증가하는 부분인  $P_T^+(t)$ 와 감소하는 부분인  $P_T^-(t)$ 로 나누어서 표현 하였다.

$$P_T(t) = P_T(jk^-) + P_T^+(t) - P_T^-(t)$$

where, (4.9)

$$P_T(t^-) = \lim_{h \downarrow 0} P_T(t-h)$$

출력이 증가하는 부분을 time interval이  $t = [jk, (j+1)k)$ 에서 정의하였다.  $t$  시점에서  $jk$ 에서 기동된 tertiary reserve의 출력은 식 (4.10)으로 표현할 수 있다.  $jk$  시점에서 기동된 tertiary reserve 출력은 ramp rate에 의해 출력량이 증가하는 부분과 목표량 중 작은 값으로 결정된다.

$$a = \min\{r_{up}(t - jk - t_d)_+, C_j P_{\min}^T\}$$

where, (4.10)

$$x_+ = \max\{x, 0\}$$

$r_{up}$  : ramp up rate

식 (4.10)의 출력량을  $a$ 라는 변수로 정의를 하였고 그림 4.11에서 time interval  $t = [jk, (j+1)k)$ 에서 점선으로 표시된 출력량을 의미한다. 식 (4.10)은  $jk$ 에서 기동이 된 tertiary reserve 출력량을 정의하였다. 그런데 tertiary reserve에는 time delay가 존재하기 때문에  $jk$ 시점 이전에 기동된 출력량이  $t$  시점에서 영향을 줄 수 있다. 다음 그림 4.12는  $jk$ 시점 이전에

기동된 출력량을 나타내었다.  $b$ 는  $t$  시점에서 증가하는 출력량을 의미하

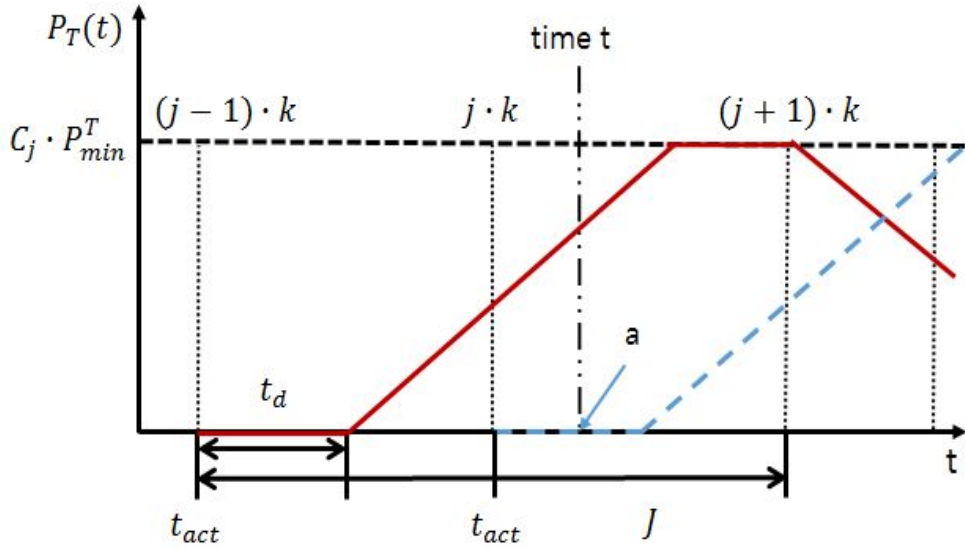


그림 4.11  $jk$ 시점에서 기동된 tertiary reserve 출력량

고  $c$ 는  $jk$ 시점에서 증가하는 출력량을 의미한다. 이 두 값의 차가 곧  $t$  시간에서  $jk$  이전에 기동된 tertiary reserve 출력량이 영향을 미치는 값이다.

위의 그림 4.12을 통해서  $b$ 와  $c$ 를 수식으로 표현하면 식 (4.11)과 식 (4.12)와 같다.

$$b = \min\{r_{up}(t - (j-1)k - t_d)_+, C_{j-1}P_{\min}^T\} \quad (4.11)$$

$$c = \min\{r_{up}(jk - (j-1)k - t_d)_+, C_{j-1}P_{\min}^T\} \quad (4.12)$$

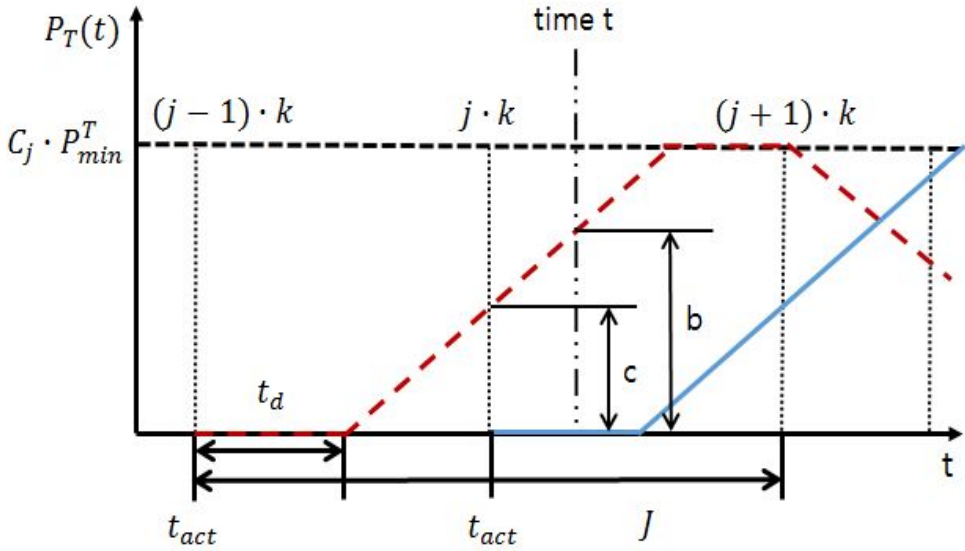


그림 4.12  $(j-l)k$  시점에서 기동된 tertiary reserve 출력량

식 (4.11)과 (4.12)의 차를 누적한 값이  $t$  시간  $(j-l)k$ 에서 기동된 tertiary reserve 출력 증가량을 나타내고 식 (4.13)과 같이 표현된다.

$$\sum_{l=1}^j [\min\{r_{up}(t - (j-l)k - t_d)_+, C_{j-l}P_{\min}^T\} - \min\{r_{up}(jk - (j-l)k - t_d)_+, C_{j-l}P_{\min}^T\}] \quad (4.13)$$

식 (4.13)과 식 (4.10)의 합이 최종적으로 tertiary reserve의 출력 증가량을 나타내며 다음의 식 (4.14)과 같다.

$$P_T^+(t) = \min\{r_{up}(t - jk - t_d)_+, C_j P_{\min}^T\} \quad (4.14)$$

$$+ \sum_{l=1}^j [\min\{r_{up}(t - (j-l)k - t_d)_+, C_{j-l} P_{\min}^T\} \\ - \min\{r_{up}(jk - (j-l)k - t_d)_+, C_{j-l} P_{\min}^T\}]$$

#### 4.4.3 Tertiary reserve 출력 감소 부분

Tertiary reserve의 출력 증가 부분과 마찬가지로 출력이 감소하는 부분도 유사하게 수학적으로 모델링할 수 있다. 그림 4.13과 같이 출력량이 감소하는 부분도 a, b, c 부분으로 나눌 수 있다. t 시간을 기준으로  $(j-l)k$ 에서 출력이 감소하는지 아니면  $jk$ 에서 출력이 감소하는지를 나누어서 수식화를 하였다. 먼저  $jk$ 에서 출력이 감소하는 부분은 a라고 정의하였고 식 (4.15)로 나타냈다. 그리고  $(j-l)k$ 에서 출력이 감소하는 부분은 출력이 증가하는 부분과 유사하게 b에서 c를 뺀 값으로 나타낼 수 있고 먼저 b와 c를 정의하면 식 (4.16)과 식 (4.17)로 나타냈다.

$$a = \min\{r_{dn}(t - jk)_+, C_{j-J} P_{\min}^T\} \quad (4.15)$$

where

$r_{dn}$  : ramp down rate

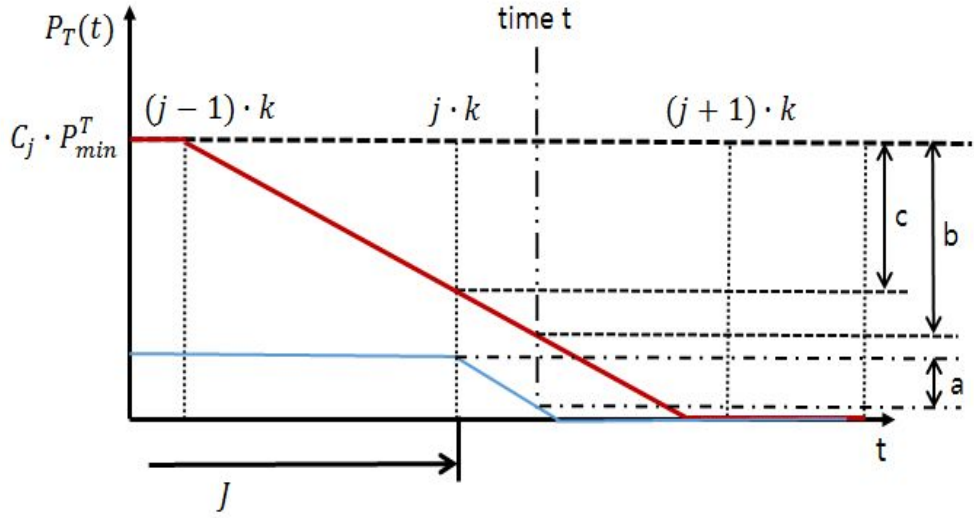


그림 4.13 Tertiary reserve의 출력량 감소 영역

$$b = \min\{r_{dn}(t - (j-l)k)_+, C_{j-l-J} P_{\min}^T\} \quad (4.16)$$

$$c = \min\{r_{dn}(jk - (j-l)k)_+, C_{j-l-J} P_{\min}^T\} \quad (4.17)$$

$(j-l)k$ 에서 출력이 감소하는 부분은  $b$ 와  $c$ 의 차의 누적 값으로 정의가 되며 최종적으로 tertiary reserve 출력이 감소하는 부분은 식 (4.19)과 같다.

$$\sum_{l=1}^{j-J} [\min\{r_{dn}(t - (j-l)k)_+, C_{j-l-J} P_{\min}^T\} - \min\{r_{dn}(jk - (j-l)k)_+, C_{j-l-J} P_{\min}^T\}] \quad (4.18)$$

$$P_T^-(t) = \min\{r_{dn}(t - jk)_+, C_{j-J} P_{\min}^T\} + \sum_{l=1}^{j-J} [\min\{r_{dn}(t - (j-l)k)_+, C_{j-l-J} P_{\min}^T\}] \quad (4.19)$$

$$-\min\{r_{dn}(jk-(j-l)k)_+, C_{j-l-J}P_{\min}^T\}]$$

출력 감소량과 출력 증가량을 수학적으로 모델링 함으로써 tertiary

reserve 출력량은 다음의 식 (4.20)과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}
P_T(t) &= P_T(jk^-) \\
&+ \min\{r_{up}(t-jk-t_d)_+, C_j P_{\min}^T\} \\
&+ \sum_{l=1}^j [\min\{r_{up}(t-(j-l)k-t_d)_+, C_{j-l} P_{\min}^T\} \\
&- \min\{r_{up}(jk-(j-l)k-t_d)_+, C_{j-l} P_{\min}^T\}] \\
&- \min\{r_{dn}(t-jk)_+, C_{j-J} P_{\min}^T\} \\
&+ \sum_{l=1}^{j-J} [\min\{r_{dn}(t-(j-l)k)_+, C_{j-l-J} P_{\min}^T\} \\
&- \min\{r_{dn}(jk-(j-l)k)_+, C_{j-l-J} P_{\min}^T\}]
\end{aligned} \tag{4.20}$$

## 제 5 장 예비력 운영 방법 모델링

### 5.1 유전 알고리즘

본 연구에서 예비력 운영 방법은 secondary reserve 필요량과 tertiary reserve의 투입시점과 투입량을 결정하는 문제이다. 다시 말해서, 시간에 따라 변화하는 수요 imbalance에 수급균형을 위해서 secondary reserve의 필요용량과 본 연구에서 제안한 tertiary reserve를 실행 방법을 결정한다. 이러한 문제를 본 연구에서는 유전 알고리즘(genetic algorithms, GA)을 통해서 최적 해를 구하였다. 유전알고리즘은 자연에서 어떠한 종(species)이 환경에 적응하기 위해서 대(generation)를 거듭할수록 유전적으로 진화하는 원리에 기초한다. 이는 확률론적인 검색 방법의 일종이다[39].

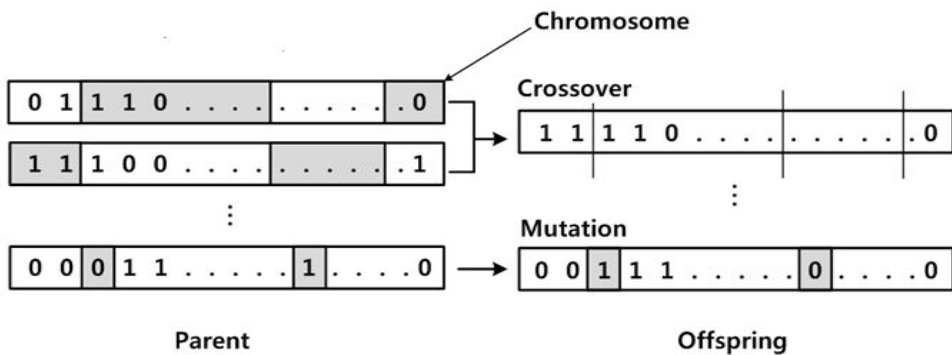


그림 5.1 유전알고리즘에서 최적해 탐색 방법



그림 5.1과 같이 최적해를 찾고자 하는 문제에서 N개의 해를 임의로 선택한다. 본 연구에서는 각 투입시점에서 tertiary reserve의 투입량을 2진수인 '0'과 '1'로 표현하였으며 이러한 조합은 마치 자연계의 염색체(chromosome)와 같은 역할을 한다. 적정 tertiary reserve 투입량을 판별하기 위해서 N개의 해에 대해서 fitness value를 만들 수 있다. Fitness value를 토대로 두 개의 해의 조합(recombination)하여 새로운 해를 만들고, 이 때 선택된 두 개의 해를 '부모(parent)', 생성된 새로운 해를 '자손(offspring)'이라고 한다. N개의 해 중 부모가 되는 해는 확률적으로 선택이 되며, fitness value가 높을수록 선택 가능성이 많아져 최적해에 접근하도록 유도한다. 즉, fitness value가 클수록 자주 선택이 되어 유사한 형태의 해를 도출하게끔 하는 반면, fitness value가 작으면 선택이 되지 못한다. 그림 5.1에서 1과 0의 조합인 두 개의 부모해가 자손을 만드는 방법을 설명하였다. 교배(crossover)와 변이(mutation)으로 새로운 해를 만들 수 있는데 교배는 두 부모 해의 특성을 자손이 물려받을 수 있도록 일련의 1과 0의 조합을 일부 떼어내어 합치는 것이다. 그리고 변이는 염색체 중 임의로 0을 1로, 또는 1을 0으로 바꾸어서 전혀 새로운 정보를 갖는 해가 되도록 한다. 따라서 이와 같은 유전알고리즘을 이용하여 tertiary reserve 적정 투입량을 결정하고 그에 따른 secondary reserve 필요 용량을 구한다.

## 5.2 예비력 운영 모델링

현재 대부분의 국가에서 예비력 운영은 전체 운영기간동안 수급불균형의 크기 및 변동성과 예비력 자원의 기능적, 경제적 상호관계를 반영하지 못한다. 예비력 운영 시 예비력 운영에 영향을 줄 수 있는 요소가 변화하여도 예비력 운영에서 secondary reserve의 필요용량은 그대로 일정하게 유지가 된다. 즉, 너무 큰 secondary reserve 용량을 계획함으로써 계통 상황이 변해도 아무런 문제가 없이 운영이 된다. 또한 secondary reserve 용량을 과도하게 계획함에 따라 tertiary reserve 투입은 거의 발생하지 않는다. 하지만 수요 예측 오차에 따른 수요 imbalance가 9.15 정전사태와 같이 secondary reserve 용량을 벗어날 경우 tertiary reserve의 투입이 필요하다. 즉, tertiary reserve를 투입함으로써 secondary reserve의 과도한 용량 계획을 억제하여 경제적으로 효율적인 예비력 운영을 유도하고, 수요 imbalance가 클 경우 secondary reserve만으로 수급균형을 하지 않기 때문에 안정적인 계통 운영이 가능하다. 본 절에서는 예비력 운영의 목적함수와 제약조건에 대해서 설명하였다.

먼저 secondary와 tertiary reserve 간의 기능적 관계를 분석하기 위해서 secondary reserve 필요용량이 변화함에 따라 tertiary reserve의 투입시점과 투입량이 어떻게 변화하는지 식 5.1을 통해서 구현하였다. Secondary와 tertiary reserve의 최소 사용량을 목적함수로 두어

secondary reserve 필요용량과 tertiary reserve의 적정 투입시점과 투입량을 구할 수 있다.

$$Obj = \min_{P_S^C, C_j} \sum_{j=0}^{M-1} \int_{jk}^{(j+1)k} P_T(t) dt \quad (5.1)$$

제약조건으로는 secondary reserve 용량 제약조건과 예비력 운영 시 주파수 허용 오차 범위 내에 존재해야 하는 제약조건이 있으며 식 (5.2)와 (5.3)과 같다.

$$P_S(t) \leq P_S^C \quad (5.2)$$

$$|\Delta f(t)| \leq \epsilon \quad (5.3)$$

두 번째로 secondary와 tertiary reserve 간의 경제적 관계를 분석하기 위해서 식 (5.4)와 같이 비용을 최소화 하는 목적함수를 적용하였다. 가격 신호에 따라서 secondary reserve 필요용량과 tertiary reserve의 운영 방법이 결정이 되며, 본 연구에서 가격 신호는 두 예비력 간 가격의 비를 적용하였다. 선행연구와 같이 예비력 가격에 대한 정확한 정보를 얻기가 어려워 tertiary reserve 가격을 기준으로 secondary reserve 가격 비율을 변화시키면서 secondary reserve 필요용량과 tertiary reserve의 적정 투입시점 및 투입량 결과를 도출하였다.

$$\begin{aligned}
Obj = \min_{P_S^C, C_j} \{ & \frac{\rho_S^r}{T} \sum_{j=0}^{M-1} \int_{jk}^{(j+1)k} P_S(t) dt \\
& + \frac{1}{T} \sum_{j=0}^{M-1} \int_{jk}^{(j+1)k} P_T(t) dt \}
\end{aligned} \tag{5.4}$$

where,

$\rho_S^r$  : Tertiary 대비 secondary reserve의 가격 비율(ratio)

제약조건은 앞 서 언급한 식 (5.2)와 (5.3)으로 동일하다.

식 (5.1)과 (5.4)를 통해서 두 예비력 간의 기능적, 경제적 상호관계를 규명을 하였다. 마지막으로 실제 가격 신호를 일차함수로 근사화 하여 secondary reserve 용량 비용과 두 예비력 사용비용의 합이 최소화 되는 예비력 운영 방법을 결정하였다. 예비력 비용은 secondary reserve 용량 비용, 에너지 비용과 tertiary reserve 에너지 비용으로 구분하였다. 세 가격 신호는 사례연구에서 독일 시장 data를 근거로 일차함수로 정의하였다 [35]. 일반적으로 secondary reserve의 용량요금이 가장 비싼 편이며, tertiary와 secondary reserve 에너지 비용 순으로 높다. 식 (5.5)는 이러한 가격 신호를 적용하여 비용을 최소화하는 목적함수이고 제약조건은 식 (5.2)와 (5.3)의 주파수와 secondary reserve 용량 제약조건이 있다. 예비력 사용량은 모의 구간에서의 평균값을 적용하였다.

$$Obj = \min_{P_S^C, C_i} \{ \rho_{S,gr}^E P_S^m + \rho_{S,c}^E \} \tag{5.5}$$

$$+ \rho_{T,gr}^E P_T^m + \rho_{T,c}^E + \rho_{S,gr}^C P_S^C + \rho_{S,c}^C \}$$

where,

$$P_S^m = \frac{1}{T} \sum_{j=0}^{M-1} \int_{jk}^{(j+1)k} P_S(t) dt$$

$$P_T^m = \frac{1}{T} \sum_{j=0}^{M-1} \int_{jk}^{(j+1)k} P_T(t) dt$$

$\rho_{S,gr}^E$ : Secondary reserve 에너지 비용 기울기

$\rho_{S,c}^E$ : Secondary reserve 에너지 비용 y절편

$\rho_{T,gr}^E$ : Tertiary reserve 에너지 비용 기울기

$\rho_{T,c}^E$ : Tertiary reserve 에너지 비용 y 절편

$\rho_{S,gr}^C$ : Secondary reserve 용량 비용 기울기

$\rho_{S,c}^C$ : Secondary reserve 용량 비용 y절편

앞 서 언급한 세 예비력 운영 모델링을 통해서 secondary와 tertiary reserve간에 기능적, 경제적 상호관계를 규명하고, 최적 예비력 운영 방법을 결정하였다. 사례연구에서 세 예비력 운영 모델 결과를 확인할 수 있다.

## 제 6 장 Illustrative Example

본 장에서는 앞 서 정의한 tertiary reserve 출력 특성을 반영하여 secondary와 tertiary reserve간의 상호 기능적 관계와 경제적 관계를 증명하고자 한다. 그리고 예제 결과를 통해서 본 연구에서 제시하는 예비력 운영 방법의 타당성을 보이하고자 한다. 예제 결과값 확인에 앞 서 수요 imbalance 모델링에 대해서 설명하였다.

### 6.1 수요 imbalance 모델링

본 연구에서 수요 imbalance를 실시간 수급 불균형 양으로 모델링을 하였다. 주파수제어에 따른 secondary reserve 출력을 결정을 해야 하므로 실시간 수요 imbalance 값이 필요하다. 일반적으로 예비력 운영 시 수요 imbalance는 장기적 관점에서 월 단위, 주 단위 또는 일단위로 예측을 한다. 그리고 단기적 관점에서는 1시간 단위로 예측을 하지만 본 연구에서는 실시간 단기 예비력 운영 방법을 적용하기 때문에 2초 단위의 수요를 모델링 하였다.

본 연구에서 제시한 수요 imbalance 모델은 단기 가격예측 모델을 응용하였다. 단기 가격예측 모델과 같이 수요 변동의 경향과 변동성을 함께 고려하였다. 이러한 수요 변동성을 모델링하기 위해서 식 (6.1)과 같이 브

라운 운동(Brownian motion with drift)과 푸아송 프로세스(Poisson process)를 이용하였다[36].

$$P_L(t) = \alpha t + \sigma B_t + \sum_{i=1}^{N_t} Y_i \quad (6.1)$$

식 (6.1)에서  $\alpha t$ 는 수요 imbalance의 경향성을 나타내며  $\alpha$ 는 실수이다.  $B_t$  ( $B_t : t \in [0, mk]$ )는 standard Brownian motion을 따르고 수요 imbalance의 변동성을 나타내며,  $\sum_{i=1}^{N_t} Y_i$ 에서  $N_t$  ( $N_t : t \in [0, mk]$ )는 발전기 탈락과 같은 큰 수요 imbalance가 발생할 횟수를 의미하며 jump 발생 빈도율( $\lambda > 0$ )에 따른 Poisson process로 모델링 하였다.  $m$ 는 tertiary reserve 투입 시점을 의미하며,  $k$ 는 투입 결정 주기인 15분을 의미한다.

Brownian motion  $B_t$ 는 식 (6.2)로 표현가능하며  $Z_i$ 는 평균이 0이고 분산이 1인 표준정규분포를 따른다[38]. 그리고  $n$ 은 표본 수를 의미하며  $n$ 은 충분히 큰 정수로 표현되며, 본 예제에서  $n=1000$ 으로 설정하였다.

$$B_t = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i=1}^{\lfloor nt/mk \rfloor} Z_i \quad (6.2)$$

where,

$\lfloor a \rfloor$ :  $a$ 보다 같거나 작은 가장 큰 정수

식 (6.1)에서  $\sum_{i=1}^{N_t} Y_i$ 는 수요 imbalance 모델에서 jump diffusion 부분을 의미하며  $N_t$ 는  $t$  시간에 점프발생 횟수이고,  $Y_i$ 는  $i$ 번째 jump 수요 imbalance의 크기이다.  $N_t$ 는 식 (6.3)과 같이 정의되고 이 식에서  $W_i$ 는  $(i-1)$ 번째 jump 발생한 시점에서  $i$ 번째 jump가 발생하기까지의 interval time을 의미하며 식 (6.3) 표현된다[37]. 다음의 그림 6.1을 통해서  $W_i$ 가 어떻게 결정되는지를 확인할 수 있다.

$$N_t = \max\{i : W_1 + W_2 + \dots + W_i \leq t\}, \quad t \in [0, mk] \quad (6.2)$$

$$W_i = -\frac{1}{\lambda} \log(1 - U_i) \quad (6.3)$$

where,

$U_i : Unif(0,1)$ , uniform distribution

그림 6.1에서  $\max\{i : W_1 + W_2 + \dots + W_i \leq t\}$ 에 의해서  $t$ 시간 보다 작은



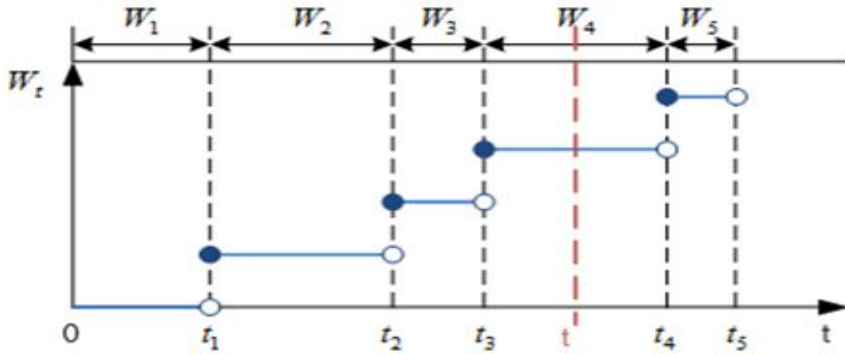


그림 6.1 Jump 발생 time interval

$W_i$ 의 I값은 3이다. 따라서 jump 발생 횟수  $N_t$ 는 3을 의미한다. 하지만 본 연구에서 jump diffusion 발생을 매우 낮게 설정하여 거의 일어나지 않게끔 시뮬레이션을 수행하였다. 다음의 그림 6.2부터 6.4는 위의 jump diffusion 방법을 적용하여 생성한 수요 imbalance를 나타냈다. 그림 6.2는 jump diffusion 발생 빈도 지표인 arrival rate을 0으로 설정하여 jump diffusion이 발생하지 않았다. 즉, arrival rate이 0에 가까우면 random walk 수요 imbalance 특성을 갖는다. 반면에 그림 6.3과 6.4는 arrival rate을 점점 증가시켜 jump diffusion이 1회 이상 발생하도록 설정하였다. Jump 발생 크기는 100(MW)로 설정을 하였고 경향성을 의미하는 기울기는 0.05로 설정하였다. 각 수요 imbalance 모델링 관련 설정 값을 표 6.1에 정리하였다.

표 6.1 수요 Imbalance 모델링을 위한 입력 값

Type	Random Walk	Jump Diffusion	Jump Diffusion
Arrival rate	$\lambda \approx 0$	$\lambda=0.01$	$\lambda=0.1$
Jump 횟수	0	1	2
기울기	0.05	0.05	0.05
최대 imbalance	230MW	310MW	400MW

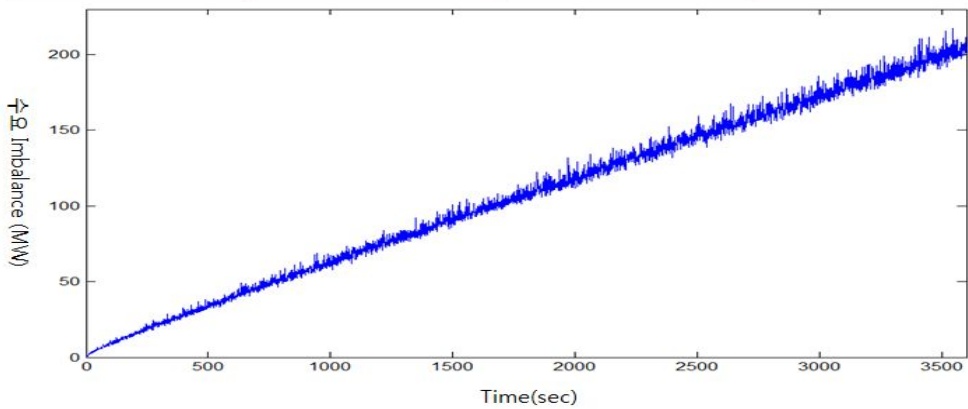


그림 6.2 수요 Imbalance - Random walk

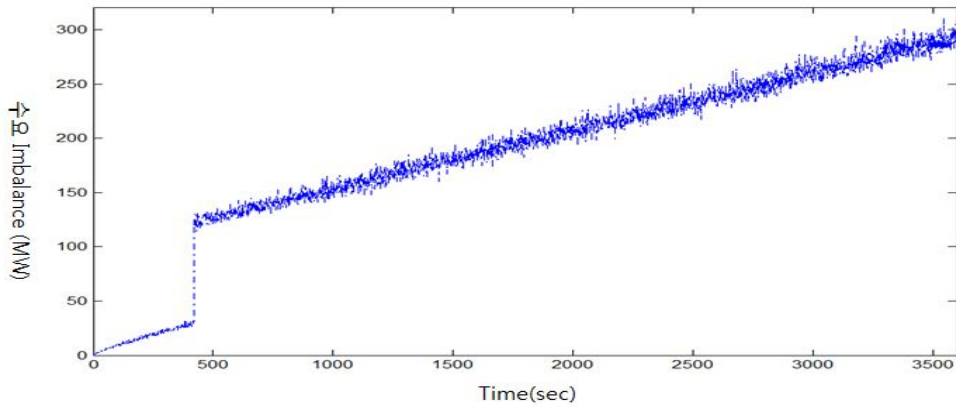


그림 6.3 수요 Imbalance - Jump diffusion (1)

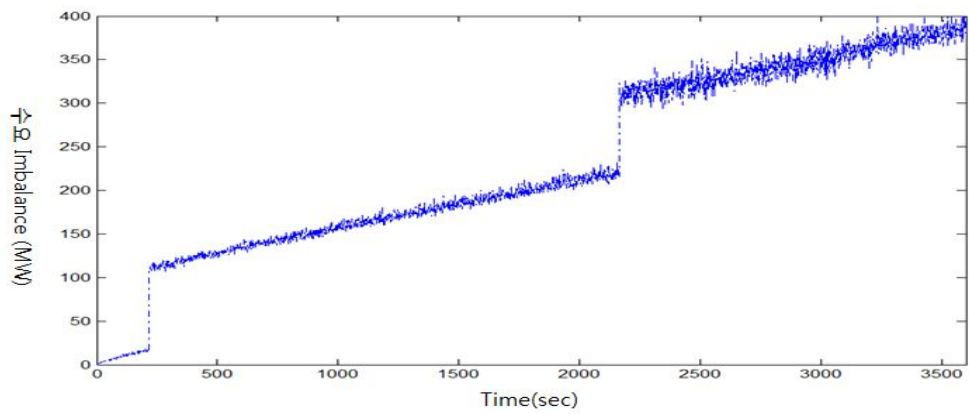


그림 6.4 수요 Imbalance - Jump diffusion (2)

## 6.2 예비력 간 기능적, 경제적 상호관계 결과 분석

본 연구에서 secondary와 tertiary reserve간의 상호관계를 통한 예비력 운영 방법을 제시하고자 한다. 따라서 본 절에서는 두 예비력 간 기능적 경제적 상호관계를 다음의 예제를 통해서 설명하였다.

표 6.2 Tertiary reserve의 투입량과 투입시점 ( $t_d=300(\text{sec})$ )

Sec_Cap (MW)	k=1	k=2	k=3	k=4
80	90 MW	130 MW	210 MW	10 MW
100	60 MW	150 MW	160 MW	40 MW
120	90 MW	110 MW	170 MW	30 MW
140	20 MW	20 MW	130 MW	40 MW
160	0 MW	90 MW	100 MW	70 MW
180	0 MW	30 MW	130 MW	40 MW
200	0 MW	20 MW	60 MW	50 MW
220	0 MW	0 MW	50 MW	40 MW
240	0 MW	0 MW	40 MW	40 MW

### 6.2.1 예비력 간 기능적 관계

Secondary와 tertiary reserve 간 기능적 관계를 확인하기 위해서 secondary reserve 필요용량을 변화시키면서 주파수를 만족하는 tertiary reserve 투입시점과 투입량 결과를 도출하였다. Tertiary reserve 투입시점

과 투입량은 출력량이 최소가 되는 방향으로 결정이 되었다. 표 6.2는 투입 시점을 의미하는 k주기마다 투입되는 tertiary reserve의량을 나타내었고, 표 6.3은 secondary reserve 필요용량에 따른 총 예비력 사용량 결과를 표시하였다.

표 6.3 Secondary reserve 필요용량에 따른 예비력 사용량

Sec_Cap (MW)	0~70	80	100	120	140
평균 사용량 (MWh)	N/A	238.9392	245.8778	247.1889	249.4
Sec_Cap (MW)	160	180	200	220	240
평균 사용량 (MWh)	250.5458	256.1712	277.0453	275.9551	276.7797

표 6.1과 6.2에서 secondary reserve 필요용량이 0에서 70인 경우 해가 없는 이유는 tertiary reserve 시지연 출력 특성 때문이다. Tertiary reserve의 cold start up time( $t_d$ )를 300sec(5분)으로 설정하여 k=1인 시점에서 tertiary reserve를 기동하여도 주파수 제약조건을 만족시키지 못한다. 그림 6.5부터 6.7은 secondary reserve가 변화함에 따라 tertiary reserve 출력량을 그래프로 나타내었다. 모든 경우를 그래프로 나타내기에는 한계가 있기 때문에 대표적인 결과만을 그래프로 나타냈다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 secondary reserve 필요용량이 클 경우 여유용량이 크기 때문에 tertiary reserve 기동이 늦게 되고 투입량이 적은 것을 확인할 수

있다. 그리고 그림 6.6과 같이 다른 그래프 보다 secondary reserve 필요용량 차이가 작을 경우 유사한 결과 값을 나타냈다. 따라서 secondary와 tertiary reserve간에는 기능적 상호관계가 존재하며, 적정 tertiary reserve의 투입시점과 투입량에 따라서 secondary reserve의 필요용량을 줄일 수 있다.

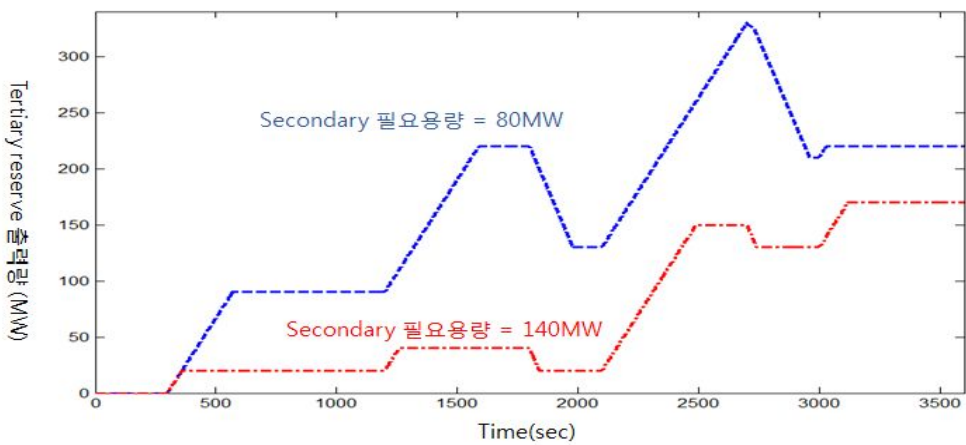


그림 6.5 Tertiary reserve 출력량 비교 (1)

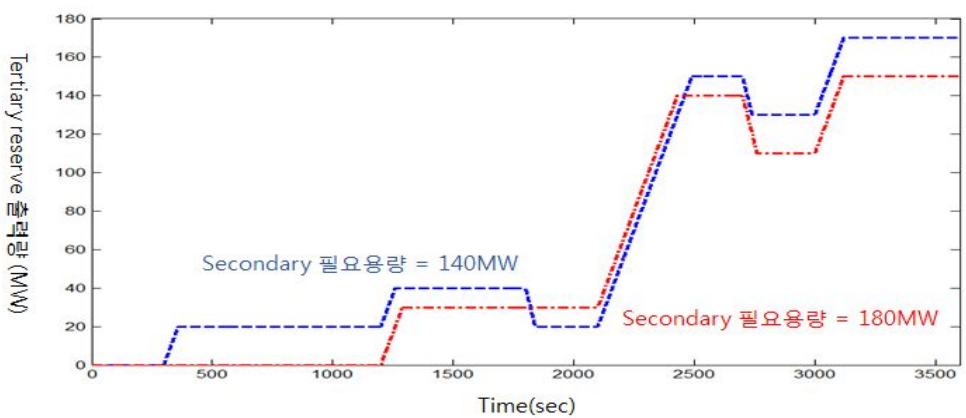


그림 6.6 Tertiary reserve 출력량 비교 (2)

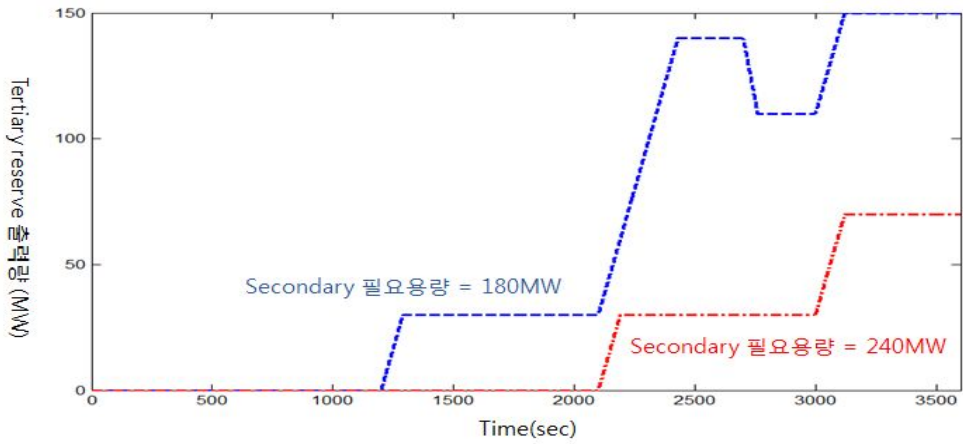


그림 6.7 Tertiary reserve 출력량 비교 (3)

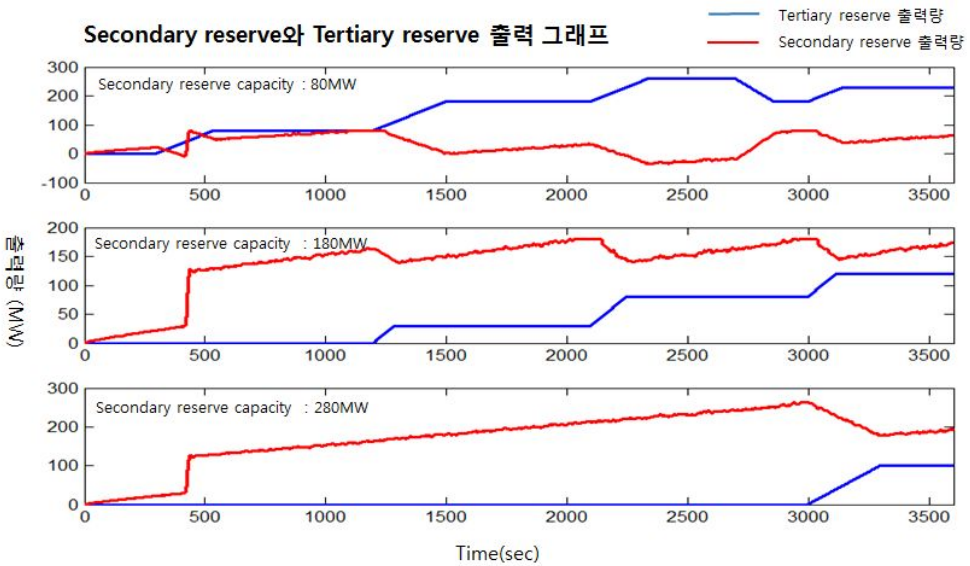


그림 6.8 Tertiary와 Secondary reserve 출력량 비교

그림 6.8은 secondary reserve 용량에 따른 secondary와 tertiary reserve 출력 결과를 비교한 그래프이다. 그리고 그림 6.9는 두 예비력의 총 합을 나타내었고, 두 예비력의 총 합은 수요 모델링과 같은 것을 확인할 수 있다.

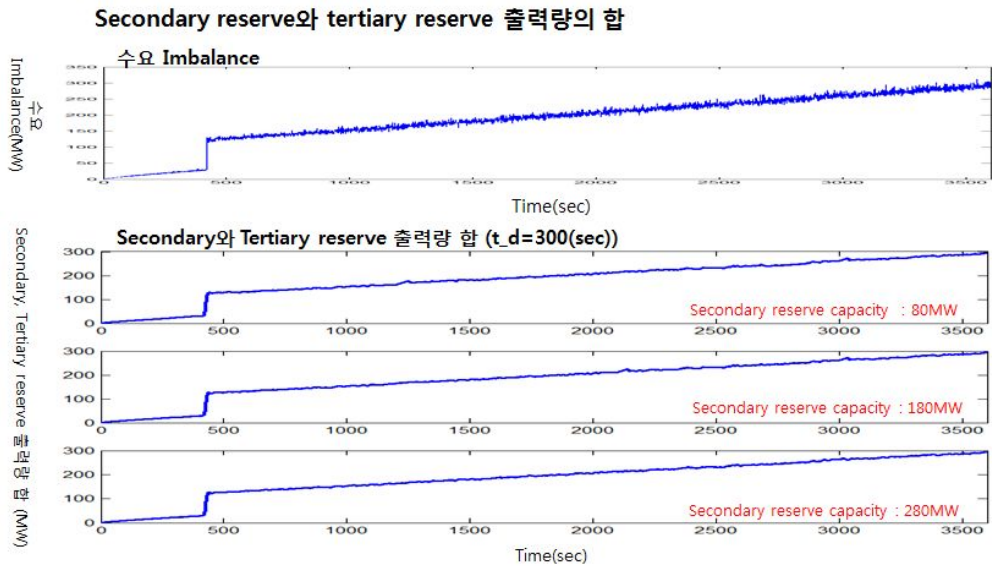


그림 6.9 Tertiary와 Secondary reserve 출력량의 합

### 6.2.2 예비력 간 경제적 관계

예비력 간 경제적 상호관계는 가격 신호에 따라 secondary reserve의 필요량과 tertiary reserve 운영 결과로 확인할 수 있다. Secondary와 tertiary reserve간의 가격 정보가 매우 복잡하고 정확한 data 획득이 어려워 본 연구에서는 일정 비율로 예비력 간 경제적 관계를 분석하였다. 다시 말해서, tertiary reserve 가격을 기준으로 secondary reserve 가격을 비율로 표현을 하였다.

Tertiary reserve의 시지연( $t_d$ )는 300(sec)으로 하였고, 수요 모델은 jump diffusion을 적용하였다. Secondary reserve의 가격을 tertiary reserve에 대한 가격 비율을 0.1에서 2까지 변화시키면서 tertiary reserve



의 투입시점과 투입량 결과 값을 표 6.4에 정리하였다.

표 6.4 가격비율에 따른 예비력 운영 결과 값 ( $t_d=300(\text{sec})$ )

Price ratio	Sec_Cap	k=1	k=2	k=3	k=4
0.1	290 (MW)	0 (MW)	0 (MW)	0 (MW)	0 (MW)
0.3	290 (MW)	0 (MW)	0 (MW)	0 (MW)	0 (MW)
0.5	260 (MW)	0 (MW)	0 (MW)	10 (MW)	20 (MW)
0.7	200 (MW)	0 (MW)	20 (MW)	40 (MW)	30 (MW)
0.9	160 (MW)	10 (MW)	50 (MW)	50 (MW)	30 (MW)
1.1	130 (MW)	30 (MW)	50 (MW)	80 (MW)	50 (MW)
1.3	90 (MW)	70 (MW)	90 (MW)	80 (MW)	50 (MW)
1.5	80 (MW)	80 (MW)	100 (MW)	80 (MW)	50 (MW)
1.7	80 (MW)	80 (MW)	100 (MW)	80 (MW)	50 (MW)
1.9	80 (MW)	80 (MW)	100 (MW)	80 (MW)	50 (MW)

Secondary reserve 가격비율이 클수록 secondary reserve 필요량은 줄어들며 최저 80(MW) 결과 값을 도출하였다. Tertiary reserve 출력 시 지연을 고려하였기 때문에 원하는 출력량을 내기 위해서는 일정 시간이 소요가 된다. 따라서 계통 주파수를 오차 범위 내로 유지시키기 위해서 일정량의 secondary reserve가 필요한 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 두 예비력 간에는 경제적인 상호관계가 존재하며, 가격 신호에 따라 secondary와 tertiary reserve 운영 방법이 달라진다. 표 6.4의 결과 값을 그림 6.10으로 정리를 하였고, 가격 비율에 따른 비용과 예비력 사용량을 표 6.5에 나타냈다.

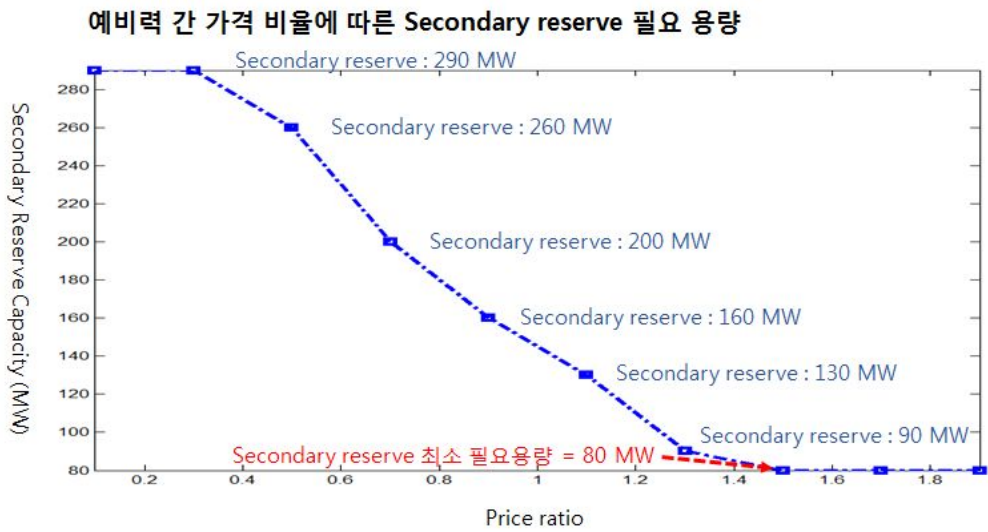


그림 6.10 가격 비율 변화에 따른 secondary reserve 필요량 ( $t_d=300(\text{sec})$ )

표 6.5 가격 비율에 따른 예비력 사용량과 비용

Price ratio	Sec_Cap (MW)	예비력 사용량 (MWh)	비용
0.1	220 MW	260.97	62.975
0.3	220 MW	266.00	112.00
0.5	220 MW	258.52	148.52
0.7	210 MW	249.45	186.45
0.9	170 MW	242.05	225.05
1	140 MW	235.47	235.47
1.1	140 MW	235.47	241.14
1.3	100 MW	240.78	270.78
1.5	80 MW	258.10	298.10
1.7	80 MW	259.30	322.30
1.9	80 MW	253.44	325.44
2	80 MW	248.72	328.72

그림 6.11의 그래프는 각 가격 비율에서 최적 secondary reserve 필요 용량에 따른 tertiary reserve 출력량 결과이다. 두 예비력 간의 기능적 관계와 같이 tertiary reserve 투입시점이 빠를수록 secondary reserve 필요량은 줄어들게 된다.

그림 6.12는 가격 비율에 따른 secondary와 tertiary reserve 출력량을 나타낸 그래프이며, 그림 6.13을 통해서 두 예비력의 총 합이 결국 수요 imbalance 모델링 한 결과와 같음을 확인할 수 있다.



그림 6.11 최적 secondary reserve 필요용량에 따른 tertiary reserve 출력량

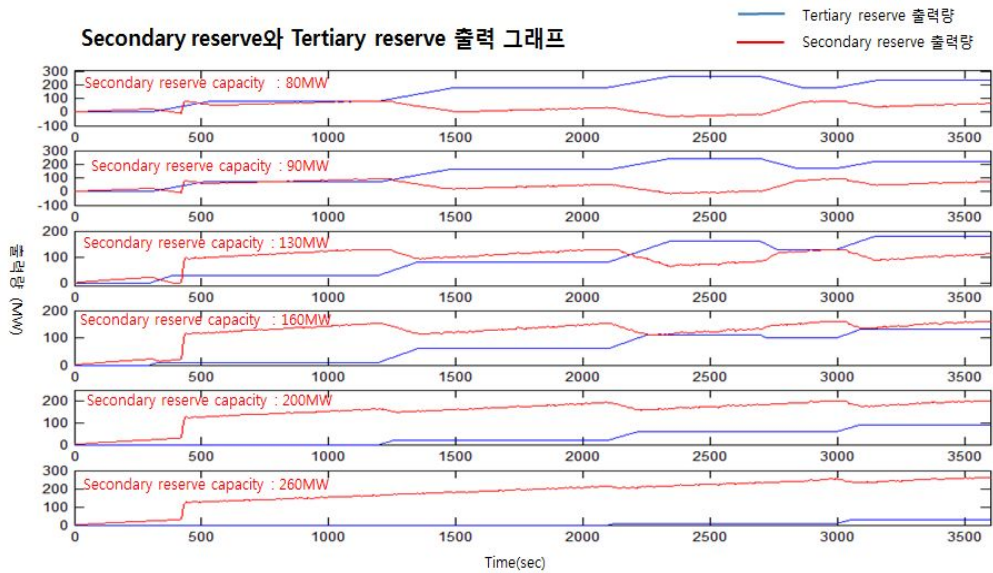


그림 6.12 Tertiary와 Secondary reserve 출력량 비교

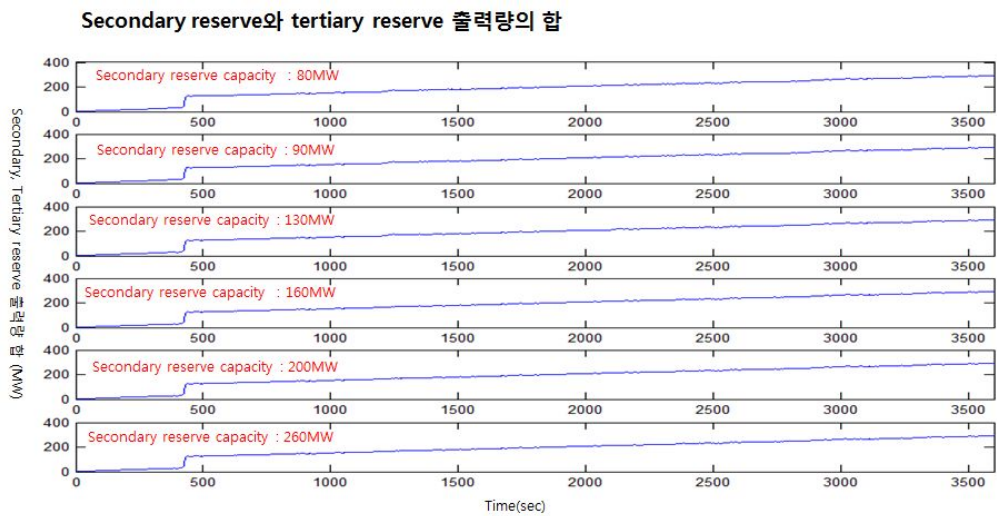


그림 6.13 Tertiary와 Secondary reserve 출력량의 합

### 6.3 경제성 평가

지금까지 secondary와 tertiary reserve간의 상호관계에 대해서 분석을 하였고 분석결과 두 예비력 간에는 기능적, 경제적 상호관계가 존재하였다. 이 결과를 토대로 현재 예비력 운영 방법과 본 연구에서 제안하는 운영 방법과 비용 측면에서 비교를 할 수 있다.

표 6.6 수요 Imbalance 구분에 따른 기존 예비력 운영에서 secondary reserve 필요용량 정의

구분	수요 모델링 개수	Jump size	변동성	경향성
크기	2,000 (개)	100 (MW)	0.1	0.05
구분	Random Walk 수요 변동		Jump Diffusion 수요 변동	
크기	220 (MW)		100 (MW)	
총 수요 변화량	320 (MW)			

현재 예비력운영에서 secondary reserve는 수요예측 오차에 의한 수요 변동성이 발생할 경우 수급균형을 위해서 동작을 한다. 비록 실계통을 적용하지는 못했지만 수요 imbalance 모델링을 두 부분으로 분리하여 현재 예비력 운영에서의 secondary reserve 필요용량과 tertiary reserve 운영 방법을 생각해 볼 수 있다. 즉, 수요예측 오차에 의한 수요 imbalance를 수급균형을 위해 자동적으로 동작하는 secondary reserve와 발전기 사고와 같은 사고 시 동작하는 tertiary reserve로 분리하였다. 본 연구에서

적용한 수요 imbalance 모델이 random walk와 jump diffusion 두 영역으로 나뉠 수 있으며, random walk에 의한 최대 수요 imbalance 양을 secondary reserve 필요용량으로 설정하였다. 표 6.6은 기존 예비력 운영 방법 모의를 위한 secondary reserve 필요용량 및 수요 imbalance에 대한 정보를 정리하였다.

경제성 평가를 위해서 두 예비력간의 가격 신호를 결정해야한다. 하지만 예비력 간의 가격 신호 체계가 복잡하고, 단순히 예비력 사용량만으로 예비력 비용이 결정되는 것이 아니기 때문에 정확한 가격 정보를 적용할 수 없었다. 따라서 예비력 자원 가격 신호를 독일 시장 가격 데이터[64]를 참고하여 본 연구에 적용하였다. 예비력 가격은 용량가격과 에너지 가격의 단위가 다르기 때문에 두 부분으로 나누었다. 표 6.7은 독일 시장 가격을 일차 함수 형태로 예비력 가격 기준을 가정한 표이다. 일반적으로 응답속도가 빠른 secondary reserve 예비력 확보를 위한 필요용량 가격이 상대적으로 높은 편이며, tertiary reserve 용량 가격은 매우 낮아 고려하지 않았다.

표 6.7 예비력 가격 기준 정보

1차 함수	Secondary reserve 용량 가격	Secondary reserve 에너지 가격	Tertiary reserve 에너지 가격
기울기	10 (원/MW)	5 (원/MWh)	5 (원/MWh)
y 절편	100 (원)	10 (원)	50 (원)

앞 서 가정한 가격 신호 정보를 적용하여 최적 secondary와 tertiary reserve 사용량과 그에 따른 secondary reserve 필요용량을 구하면 표 6.8 과 같다. Secondary reserve 최적 필요용량은 80(MW)이며 예비력 운영 비용과 평균 예비력 사용량 결과를 확인할 수 있다. 또한 secondary reserve 필요용량을 220(MW)라고 설정을 한 후 secondary와 tertiary reserve 사용량 결과 값을 통해서 본 예비력 운영 방법과 비교를 하였다. 기존 예비력 운영 방법보다 secondary reserve 필요용량과 사용량이 줄어들었고, 줄어든 양에 비례하여 tertiary reserve 사용량은 증가하였다. 하지만 전체 운영 비용은 본 연구에서 제시한 예비력 운영 방법이 낮았다. 따라서 tertiary reserve를 사고 발생만을 대비해서 운영하는 것 보다 수요 imbalance 크기에 따라 예비력 간 구분 없이 계통의 안정성과 경제성을 고려한 운영이 필요하다. 그림 6.10은 두 결과의 secondary reserve 필요용량과 그에 따른 tertiary reserve 출력량을 그래프로 표현하였다.

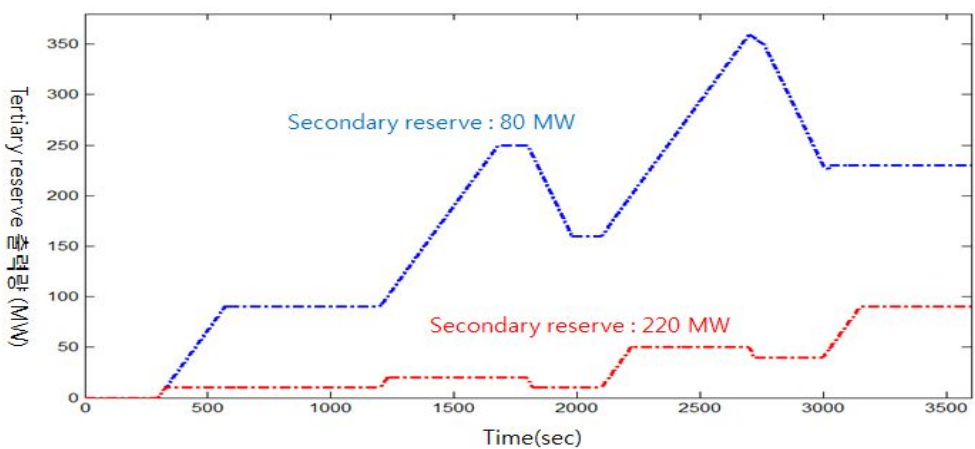


그림 6.14 예비력 운영에 따른 tertiary reserve 출력량 변화



표 6.8 예비력 운영에 따른 결과

	기존 운영 방법	개선된 운영 방법
Secondary reserve 필요용량	220 (MW)	80 (MW)
Secondary reserve 사용량	153.43 (MWh)	43.84 (MWh)
Tertiary reserve 사용량	31.59 (MWh)	172.6 (MWh)
운영 비용	3285.13 원	1139.22 원
Tertiary 출력		
k=1	10 (MW)	90 (MW)
k=2	10 (MW)	160 (MW)
k=3	40 (MW)	210 (MW)
k=4	50 (MW)	40 (MW)



## 6.4 시지연 크기 변화에 따른 예비력 운영

앞 절 6.2에서의 예제는 secondary reserve의 필요용량과 두 예비력간의 가격 신호에 의한 예비력 운영 방법에 대해서 설명하였다. 본 절에서는 tertiary reserve 시지연( $t_d$ ) 크기에 의한 예비력 운영 방법에 대해서 분석하고자 한다. Tertiary reserve가 빠르게 출력을 내는 경우 최적 예비력 운영이 어떻게 달라지는지 확인함으로써 예비력 출력 속도와 tertiary reserve의 가치를 보이하고자 한다.

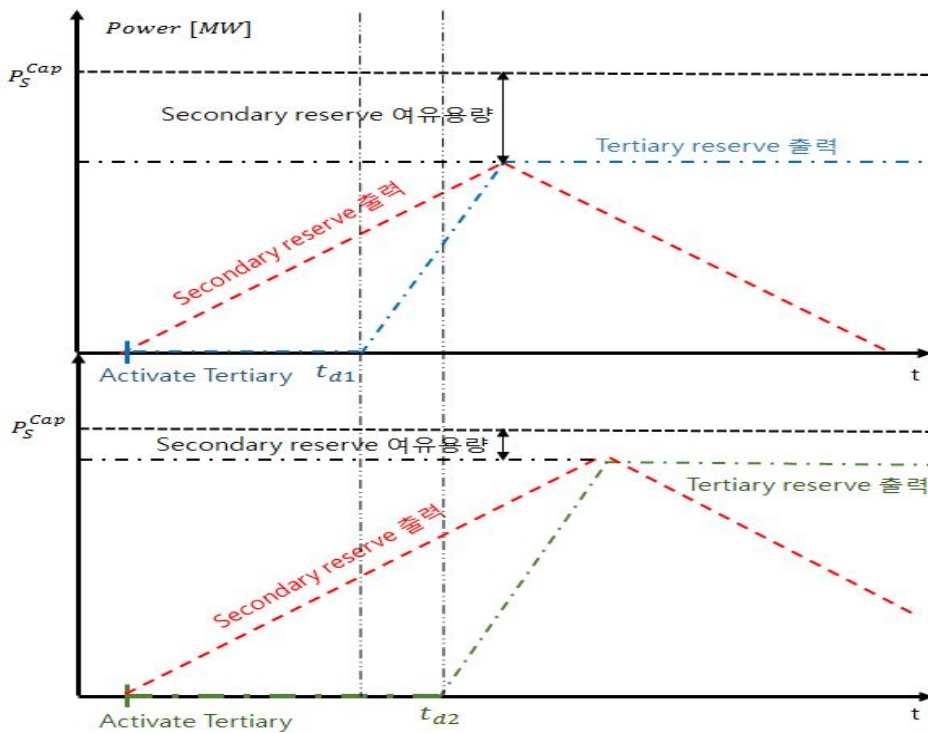


그림 6.15 Tertiary reserve 출력 속도에 따른 예비력 운영 변화

그림 6.15에서 tertiary reserve가 빠르게 출력을 내는 경우 secondary reserve 여유용량이 증가한다. 즉, 여유용량이 늘어난 만큼 secondary reserve의 필요용량이 줄어들 수 있으며 tertiary reserve 출력 속도에 따라서 secondary reserve 필요용량이 달라진다. 그림과 같은 결과를 확인하기 위해서 시지연을  $t_d=100, 300, 500$ 으로 증가시키면서 secondary reserve 필요용량을 구하였다. 전체 예비력 사용량은 비슷하지만 예비력 내에 secondary와 tertiary reserve 사용량이 tertiary reserve 시지연 값일 클수록 secondary reserve 사용량이 크다. 반대로, tertiary reserve가 빠르게 동작함으로써 secondary reserve 사용량이 감소가 되었고 여유용량만큼 필요용량이 감소하였다. 이러한 결과는 다음 표 6.9로 정리하였다. 그리고 각 시지연에 따른 tertiary reserve 출력은 그림 6.16과 같다.

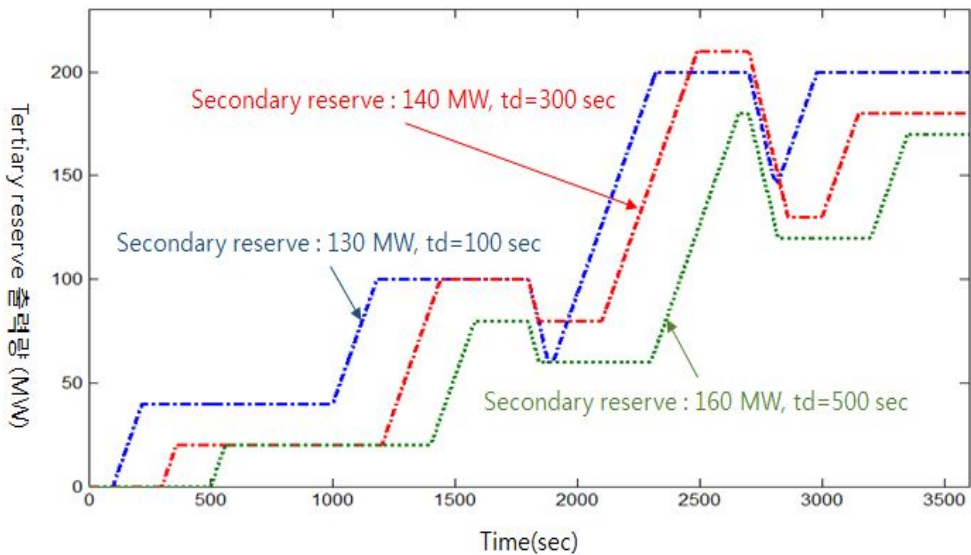


그림 6.16 시지연( $t_d$ ) 변화에 따른 tertiary reserve 출력량 변화

표 6.9 시지연( $t_d$ ) 변화에 따른 예비력 운영 결과

Time delay ( $t_d$ )	Secondary reserve 필요용량 (MW)	예비력 사용량 (MWh)	Secondary reserve 출력량 (MWh)
100 (sec)	130	235.228	79.869
300 (sec)	140	235.474	91.928
500 (sec)	160	236.064	106.008

Tertiary reserve 출력량				
Time delay ( $t_d$ )	k=1	k=2	k=3	k=4
100 (sec)	40 (MW)	60 (MW)	140 (MW)	60 (MW)
300 (sec)	20 (MW)	80 (MW)	130 (MW)	50 (MW)
500 (sec)	20 (MW)	60 (MW)	120 (MW)	50 (MW)

## 6.5 선행 연구 예비력 운영 방법과의 차이점

선행 연구에서 tertiary reserve 출력이 step function으로 정의가 되었고 출력량은 secondary reserve 필요용량의 배수가 되게끔 출력량이 결정되었다. 하지만 본 연구에서는 주파수제어예비력이라는 용어에 맞게 예비력 운영 시 주파수를 고려하였고, tertiary reserve 출력은 시지연 특성을 반영하고 secondary reserve 필요용량의 배수가 되는 형태로 출력량을 가정하지 않았다. 본 절에서는 선행 연구에서 모의한 방법을 그대로 구현함으로써 본 연구와 어떤 결과 차이가 있는지 논의하였다. 선행 연구는 시지연이 없는 출력이므로  $t_d$ 와 ramp rate이 모두 0으로 설정하였다. 다음 표 6.10은 이러한 조건을 반영한 예비력 운영 결과 값이다.

표 6.10 시지연이 없는 예비력 운영 결과

Time delay (t_d)	Secondary reserve 필요용량 (MW)	예비력 사용량 (MWh)	Secondary reserve 출력량 (MWh)	
0 (sec)	50	230.489	24.697	
300 (sec)	140	235.474	91.928	
Tertiary reserve 출력량				
Time delay (t_d)	k=1	k=2	k=3	k=4
0 (sec)	100 (MW)	100 (MW)	100 (MW)	50 (MW)
300 (sec)	20 (MW)	80 (MW)	130 (MW)	50 (MW)

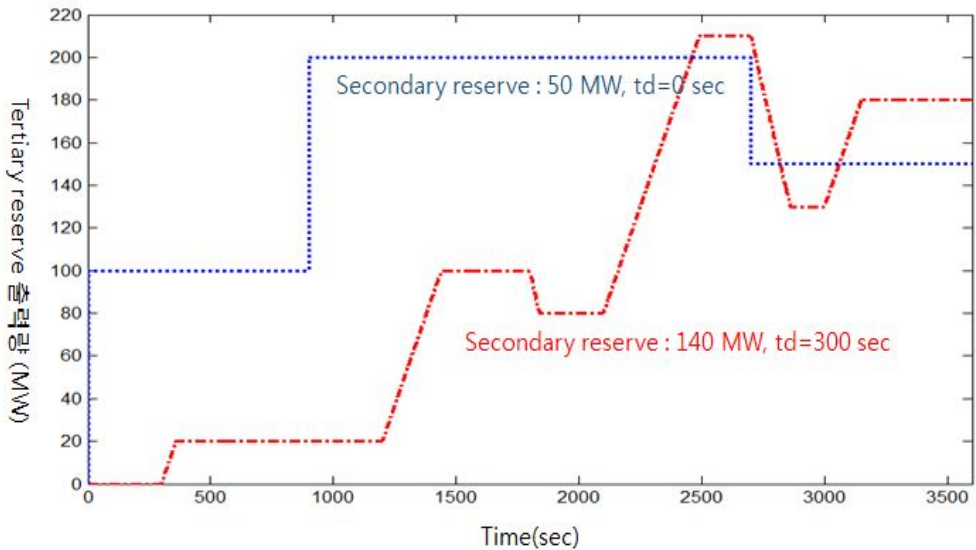


그림 6.17 시지연이 없는 tertiary reserve 출력량 그래프

앞 결과 유사하게 시지연  $t_d$ 를 0으로 설정하였고 그 결과 secondary reserve 필요용량은 감소하고, 감소한 만큼 tertiary reserve 출력량은 증가하였다. 시지연  $t_d$ 가 작을수록 빠른 응답이 가능하기 때문에 tertiary reserve의 가치는 증가하게 된다. 따라서 시지연 정도에 따라 tertiary reserve 가치가 변화하기 때문에 시지연  $t_d$ 를 0으로 설정해서 secondary reserve의 필요용량을 구하는 것은 최적 용량을 구하는데 한계가 있다. 시뮬레이션 초반에는 tertiary reserve 출력량에서 큰 차이가 난다. 시지연이 없는 경우 tertiary reserve를 투입함에 따라 secondary reserve의 여유용량을 모두 복구하지만 시지연이 존재하는 경우 초기 시점에서는 secondary reserve 출력이 크다. 하지만 시간이 갈수록 tertiary reserve 출력량은 결국 유사한 값으로 결정이 된다. 이러한 결과 값으로 시지연이 없

는 tertiary reserve를 적용하는 경우에는 투입시점과 투입량을 결정하는 것이 의미가 없기 때문에 실시간 예비력 운영보다는 계획에서 활용이 가능하다.

본 연구에서도 시지연을 하나의 값으로 가정을 하였다. 하지만 계통 상에는 여러 대의 시지연 크기가 다른 tertiary reserve가 존재한다. 따라서 보다 정확한 최적 용량을 구하기 위해서는 서로 다른 시지연 값을 갖는 두 대 이상의 tertiary reserve를 고려하여 예비력 운영을 고려해야 한다. 본 연구에서는 하나의 시지연 값을 갖는 tertiary reserve로 한정하고 향후 연구에서 이 부분을 고려할 필요가 있다.

## 제 7 장 사례 연구

6장에서는 illustrative example을 통해서 효율적인 예비력 운영 결과를 도출하였다. 본 장에서는 2011년 9월 15일 수급불균형에 따른 순환정전 사례연구를 통해서 제안한 예비력 운영 방법 적용 결과 안정적인 계통 운영이 가능하다는 측면을 보여주고자 한다. 먼저 915 순환 정전 발생 원인과 시간대 별 KPX의 대처 상황을 정리하였고, 이를 토대로 915 순환정전 당시의 수요 imbalance 모델링을 하였다. 그리고 본 연구에서 제안하는 tertiary reserve 운영 범위를 확대함으로써 안정적인 계통 운영 결과를 도출하였다.

### 7.1 915 순환 정전 상황

2011년 9월 15일 계통 내에 사고가 발생하지 않은 상황에서 공급 능력 한계에 따라 순환정전이 발생하였다. 당시 순환정전 발생 원인으로는 이상기온 현상으로 수요가 예측과 다르게 크게 증가하였고, 공급가능 용량 내 양수 발전기 출력이 제한되어 실제 예비력 용량과는 큰 차이가 발생하였다. 또한 사고가 발생하지 않아서 기동속도가 느린 tertiary reserve 투입 결정을 고려하지 않은 운영상의 문제점도 있었다. 다음의 표는 순환

정전 상황을 시간대 별로 나타내었다. 오전 10시 경 수요 증가로 수급불균형을 인식하였지만 수요가 감소할 것으로 예측하여 그 위험성을 간과하였다. 그러나 지속적인 수요 증가로 13시부터 직접 부하제어가 수행되었고, 저수용량 부족으로 15시부터 secondary reserve 역할을 수행하는 양수 발전원이 탈락함에 따라 KPX에서는 부하차단을 실시하였다. 부하 차단은 총 5000(MW)가 수행되었으며 이와 같은 상황을 토대로 당시의 수요 imbalance를 모델링 할 수 있다.

표 7.1 시간대별 915 순환정전 상황 정보

915 순환정전 상황		
10시	위험성 인지	전일 예측된 수요보다 크게 증가할 것으로 예측하여 수급균형 위험 인식
11시	위험성 간과	수급균형 불안정성 위험을 보고하였으나 수요가 감소할 것으로 생각함
13시	직접 부하제어	지속적인 수요 증가로 직접 부하제어를 통한 수요 감소 시작
15시	양수 발전기 탈락 부하차단 2500 (MW)	저수지 부족으로 양수 발전원들의 출력 중단에 따른 부하차단 수행 규모가 큰 부하 차단 수행 결과 지역 별로 불안정한 상황 발생
16시	부하차단 2500 (MW)	계통이 불안정한 지역의 부하를 차단하는 형태로 계통 운영 (순환 정전)

## 7.2 915 순환 정전 수요 Imbalance

915 순환 정전 모의를 위해서 먼저 당시의 수요 imbalance 모델링이 필요하다. 수요 imbalance 모델링을 위해서 실수요와 예측 수요 data 정보가 필요하지만 실시간 data는 구하기 어려워 1시간 단위의 실수요와 예측 수요를 적용 하였다. 표 7.2에서 확인할 수 있듯이 실 수요 imbalance



값은 실수요에서 예측수요의 차이다. 하지만 KPX에서 13시 이후로 직접 부하제어와 15시와 16시에 각각 2500(MW)의 부하 차단을 하였기 때문에 실 수요는 직접부하제어와 부하차단을 더한 값이 된다. 따라서 사례연구에서의 수요 imbalance를 모의 수요 imbalance라고 정의를 하고 표와 같이 실 수요 imbalance 보다 큰 값을 갖는다. 그리고 시간과 시간 내의 값들은 random walk를 수요 imbalance 값을 정의하였다. 다음 그림 7.1은 사례연구에서 적용한 수요 imbalance를 나타내었다.

표 7.2에서 seocndary reserve 용량은 secondary reserve 공급가능용량(68,602(MW))에서 예측 수요를 뺀 값으로 정의를 할 수 있다. 하지만 양수 발전기가 15시와 16시에 출력 제한이 되기 때문에 실제 secondary reserve 용량은 양수 발전기가 탈락한 양 만큼 뺀 값으로 정의하였다.

표 7.2 915 순환정전 당시 수요 Imbalance와 Secondary reserve 용량

(MW)							
Time	실 수요	예측 수요	실 수요 Imbalance	직접부하 제어	모의 수요 Imbalance	양수 발전기 출력 제한	Secondary reserve 용량
11시	64,317	60,670	3,647	0	3,647	0	7.932
12시	65,635	61,115	4,520	0	4,520	0	7.487
13시	63,204	59,817	3,387	1,220	4,607	0	8.785
14시	66,353	61,718	4,635	330	4,965	0	6.884
15시	67,281	62,538	4,743	650	7,893	1,291	6.064 (4,773)
16시	65,593	62,254	3,339	650	6,489	2,050	6.348 (4,198)

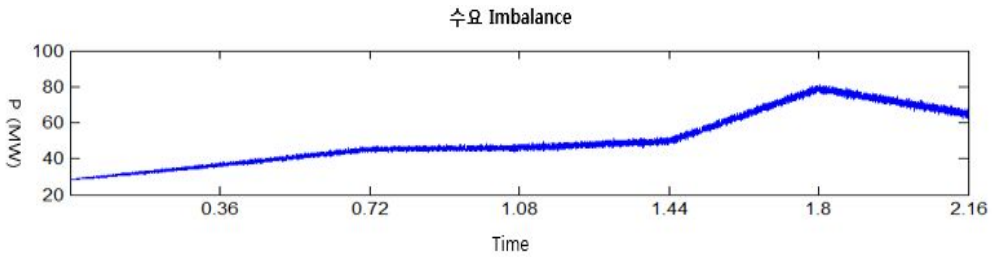


그림 7.1 사례 연구 수요 imbalance

### 7.3 915 순환 정전 모의

다음 그림 7.2의 첫 번째 그래프는 915 순환정전 당시 직접부하제어 (DLC) 적용 전 수요 imbalance 값과 secondary reserve 사용 가능용량을 나타낸 그래프이다. 양수 발전기가 탈락하지 않았을 경우와 탈락 했을 경우로 나누어 secondary reserve 사용 가능용량을 나타내었다. 그래프에서 양수 발전기가 탈락을 하지 않은 경우에도 secondary reserve 사용 가능용량은 수요 imbalance 보다 작다. 두 번째 그래프는 DLC를 적용했을 경우의 수요 imbalance 값을 적용하였다. 이 경우도 마찬가지로 secondary reserve 사용가능용량이 수요 imbalance에 비해서 부족하며, DLC 만으로는 915 순환정전 당시 수급불균형을 해소할 수 없었다는 것을 확인할 수 있다.

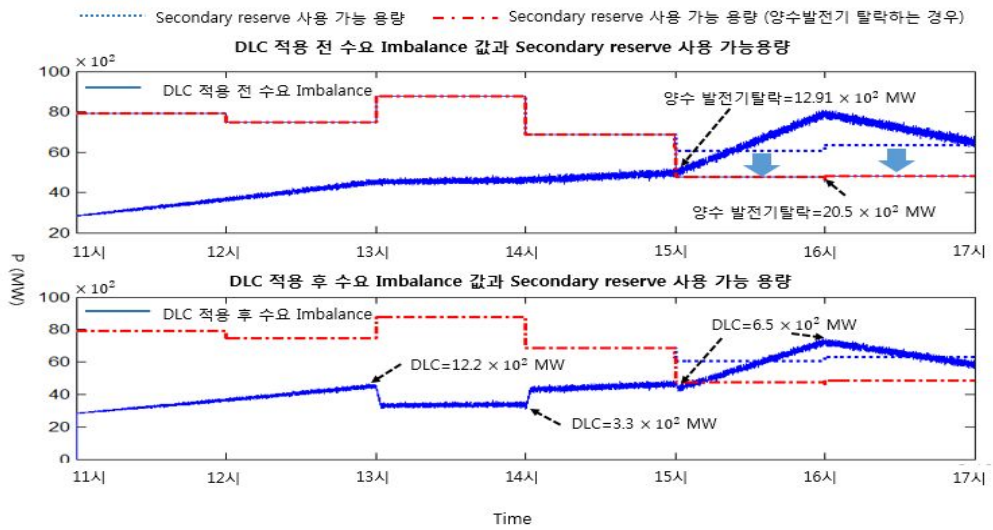


그림 7.2 수요 Imbalance와 Secondary reserve 출력 가능용량

다음의 그림 7.3은 915 순환정전 당시의 실제 주파수 모의를 한 결과 값이다. 부하 차단을 수행하지 않았을 경우 15시 이후 주파수가 지속적으로 하락하여 계통 붕괴를 초래하며, 부하차단을 수행하였을 경우 15시와 16시에 주파수 흔들림이 있지만 복구가 되는 것을 확인할 수 있다.

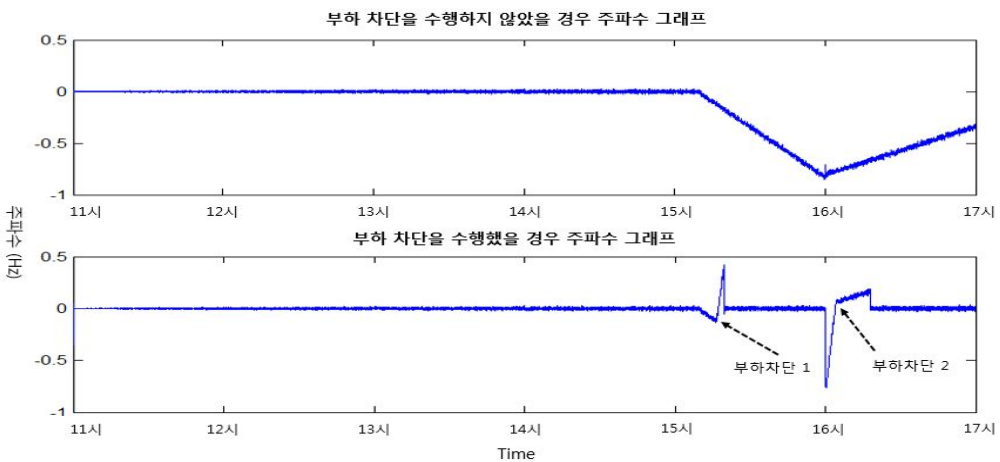


그림 7.3 부하 차단 수행 유/무에 따른 주파수 모의 결과

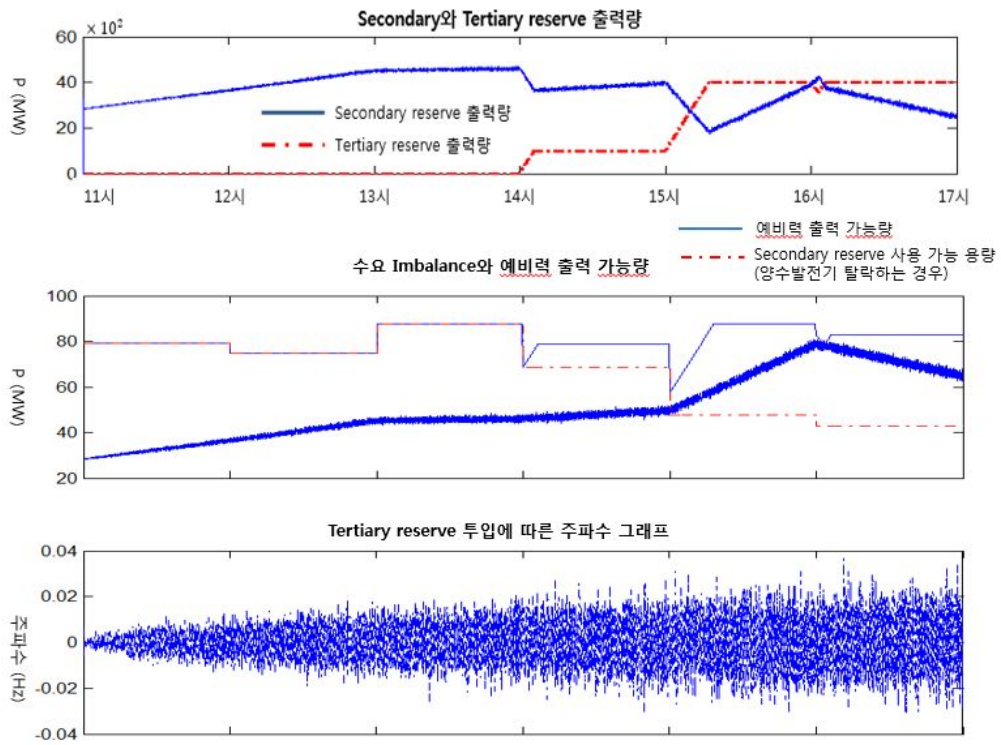


그림 7.4 Tertiary reserve 확대 운영에 따른 결과 그래프

그림 7.4는 본 연구에서 제안하는 예비력 운영 방법을 적용하였다. Tertiary reserve의 cold start up time을 1시간으로 설정을 하였기 때문에 13시에 tertiary reserve가 처음으로 activate 되었다. 그리고 수요 imbalance가 점차 증가함에 따라 14시에 3000(MW) tertiary reserve가 activate 되는 것을 확인할 수 있다. Tertiary reserve 출력이 증가함에 따라 secondary reserve 출력량은 감소하고 secondary reserve 사용 가능용량 내에서 출력량이 결정된다. 두 번째 그래프는 tertiary와 secondary reserve 출력량의 합을 나타내었고, 수요 imbalance와 같은 형태로 나타난다. 마지막으로 주파수가 허용 오차인 0.05Hz 내에서 동작하는 것을 확

인할 수 있다. 따라서 tertiary reserve 운영 범위를 확대하는 본 연구에서 제안하는 예비력 운영 방법을 통해서 부하차단과 DLC 없이 안정적인 계통운전을 할 수 있다. 사례 연구를 통해서 본 연구에서 제안하는 예비력 운영 방법을 현재 전력계통 예비력 운영에 바로 적용하기는 현실적으로는 어렵다. 하지만 신재생 에너지원 증대, 이상 기온 등으로 인한 수요 불확실성이 큰 미래 전력계통 환경에서의 예비력 운용 방법에서 적용 가능할 것으로 보인다.

## 제 8 장 결 론

기존 예비력 운영은 예비력 간에 그 역할을 구분하여 독립적으로 실행되었다. 본 연구에서는 예비력 간에 독립적으로 구분하지 않고 경제적, 기능적 상호관계를 적용한 새로운 예비력 운영 방법을 제시하였다.

현재 각 국가의 예비력 운영을 주파수제어예비력이라고 정의를 한다. 하지만 실제 예비력은 SO가 수요 imbalance가 발생하였을 때 현재 기동된 발전자원으로 수급균형을 하지 못할 것을 대비한 새로운 발전자원을 의미하며 주파수제어와의 관계가 명확하지 않다. 따라서 본 연구에서는 먼저 예비력을 정의하였다. 먼저 UCTE 기준으로 primary, secondary, tertiary reserve로 분류를 하였고 각 예비력 별로 정의를 하면 다음과 같다. Primary reserve는 개별 발전자원들이 주파수 변화에 따른 governor free control을 통해서 출력량이 결정이 되어 개별 발전기의 여유용량이라고 정의하였고, secondary reserve는 개별 발전기들이 집합인 시스템 상의 여유용량이라고 정의하였다. 마지막으로 tertiary reserve는 secondary reserve 여유용량 확보를 위해서 SO가 manual로 기동시키는 발전자원으로 정의했다. 그리고 이러한 예비력 출력량은 실시간으로 수요와 공급량 정보를 얻을 수 없기 때문에 SO는 간접적으로 주파수 신호를 획득하여 운영을 한다. 이러한 이유로 예비력을 주파수제어예비력이라고 일컫는다.

현재 예비력 운영 관련 연구는 예비력 용량 확보에 중점적으로 수행

되고 있다. 이러한 용량 결정은 주로 결정론적 방법을 통해서 이루어지고, 결정론적 방법의 한계를 극복하기 위해서 확률론적 방법을 사용한다. 이러한 기존 예비력 운영 방법은 전력계통의 불확실성을 반영하기는 하였으나, 전체 예비력용량 또는 사고/비사고 기준에 따른 예비력 용량만을 결정하는 한계가 있다. 즉, 예비력 간의 기능적, 경제적 상호관계를 고려하지 않고 예비력 간 독립적으로 구분하여 용량을 결정하였다. 하지만 미래의 전력계통 환경은 이상기온, 대규모 신재생에너지원의 계통 연계에 따라 수요 변동성이 매우 커지며, 이러한 불확실성에 대처할 수 있는 체제 개편이 필요하다. 대표적인 실례가 9.15 정전사태이며 사고 상황이 아닌 이상기온에 따른 수요 변동성이 커서 공급 부족현상이 발생하였다. 따라서 예비력 간에 사고/비사고 경계기준이 소멸되어야 하고 예비력 자원이 불확실성에 대처할 수 있게끔 상호 협조할 수 있는 예비력 자원으로 수용성을 확대해야 한다.

예비력의 기능적, 경제적 상호관계를 고려한 예비력 운영을 위해서 본 연구에서는 예비력 분류에 따라 각 예비력 출력을 수학적으로 모델링을 하였으며, 예비력 운영 문제에 적용하였다. 또한 실시간 상황을 반영하기 위해서 2초단위의 수요 imbalance 모델링을 하였고, 유전 알고리즘을 이용하여 예비력 운영의 최적 해를 구하였다.

사례연구에서 실시간 수요 imbalance를 적용하여 모의한 결과 secondary와 tertiary reserve간 기능적, 경제적 상호관계를 규명하였다.

그리고 용량가격과 에너지가격 신호를 반영하여 기존 예비력 운영과 본 연구에서 제안한 예비력 운영 방법과의 결과 비교를 통해서 경제성 평가를 수행하였다. Tertiary reserve 수용성을 확대하여 secondary reserve와 연계하여 수요 imbalance에 대응할 경우 비용절감 효과가 큰 것을 확인할 수 있었다. 그리고 tertiary reserve 출력량을 변화시킴으로써 secondary reserve 필요용량이 감소되었고, 응답 속도가 빠를수록 secondary reserve 필요용량 감소만큼의 가치가 존재한다. 마지막으로 시지연 tertiary reserve를 고려하지 않은 선행 연구와의 결과 비교를 하였다.

결론적으로 본 연구에서는 예비력 간에 기능적, 경제적 상호관계를 고려하여 적정 secondary reserve 필요용량과 secondary 사용량, 그리고 tertiary reserve 투입시점과 투입량을 결정하는 방법을 제시하였고, 이러한 예비력 운영 방법을 통해서 수요 변동성이 큰 전력계통 환경에서 안정적이고 효율적인 계통 운영을 할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 tertiary reserve 출력 증/감발량을 일정한 값으로 가정을 하였다. 여러 대의 tertiary 발전자원을 고려한 연구로 확대 진행이 필요할 것으로 보인다.



## 참 고 문 헌

- [1] F. A. Wolak, *Market design and price behavior in restructured electricity markets: An international comparison*, Springer, 2000.
- [2] F. P. Sioshansi, “Electricity Market Reform: What have we learned? What have we gained?,” *The Electricity Journal*, vol. 19, no. 9, pp. 70–83, 2006.
- [3] P. Joskow, “Lessons learned from electricity market liberalization,” *The Energy Journal*, vol. 29, no.2, pp. 9–42, 2008.
- [4] 김선교, 경쟁 시장에서의 적정 주파수제어예비력 용량 결정 방안 연구, 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사 학위 논문, 2014.
- [5] 한국전력거래소, 전력시장의 효율적 향상을 위한 계통운영보조서비스 개선방안에 관한 연구, 2007.
- [6] M. Shahidehpour, H. Yamin, and Z.Y. Li, *Market Operations in Electric Power Systems*, John Wiley&Sons, Inc., New York, 2002.
- [7] K. W. Cheung, “Ancillary Service Market design and implementation in North America: From theory to practice,” *DRPT2008*, Nanjing China, 6–9 April 2008.
- [8] 김성수, 경쟁적인 전력사업 환경하에서의 예비력 운용에 관한 연구, 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사 학위 논문, 1999.

- [9] Y. G. Rebours and D. S. Kirschen, A Survey of Definitions and Specifications of Reserve Services, University of Manchester Press, Manchester, 2005.
- [10] Y. G. Rebours, D. S. Kirschen, M. Trotignon and S. Rossignol, "Survey of Frequency and Voltage Control Ancillary Services – Part I: Technical Features," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 350–357, 2007.
- [11] F. D. Galiana, F. Bouffard, J. M. Arroyo, and J. F. Restrepo, "Scheduling and pricing of coupled energy and primary, secondary, and tertiary reserves," *Proc. IEEE*, vol. 93, no. 11, pp. 1970–1983, Nov. 2005.
- [12] F. Bouffard and F. D. Galiana, "An electricity market with a probabilistic spinning reserve criterion," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 300–307, Feb. 2004.
- [13] M. J. Nokandi and H. Monsef, "Scheduling of Spinning Reserve Considering Customer Choice on Reliability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 4, pp. 1780–1789, Nov 2009.
- [14] M. Najafi, M. Ehsan, M. Fotuhi-Firuzabad, A. Akhavein, and K. Afshar, "Optimal reserve capacity allocation with consideration of customer reliability requirements," *Energy*, vol. 35. no.9, pp.

- 3883–3890, 2010.
- [15] M. Scherer, M. Zima, and G. Andersson, “An integrated pan-European ancillary services market for frequency control,” *Energy Policy*, vol. 62, pp.292–300, 2010.
- [16] Y. G. Rebours and D. S. Kirschen, A Survey of Definitions and Specifications of Reserve Services, University of Manchester Press, Manchester, 2005.
- [17] E. Ela, M. Milligan, and B. Kirby, Operating Reserves and Variable Generation Technical Report, NREL/TP-5500-51928, Aug. 2011.
- [18] 전력거래소, 계통규모 확대에 따른 적정 공급 및 운영예비력 산정에 대한 연구, 2011.
- [19] 전력거래소, 전력시장운영규칙, 2013.
- [20] Prabha Kundur, *Power System Stability and Control*, The EPRI Power System Engineering Series, vol. 2, pp. 581–626, 1993.
- [21] Eurelectric, *Connection Rules for Generation and Management of Ancillary Services*, 2000-130-0003, Eurelectric, May 2000.
- [22] A. J. Wood and B. F. Wollenberg Power Generation, Operation and Control, 1996 :Wiley
- [23] Y. G. Rebours , D. S. Kirschen , M. Trotignon and S. Rossignol

- "A survey of frequency and voltage control ancillary services – Part II: Economic features", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, pp.358 –366 2007
- [24] Y. G. Rebours , D. S. Kirschen , M. Trotignon and S. Rossignol  
 "A survey of frequency and voltage control ancillary services – Part I: Technical features", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, pp.350 –357 2007
- [25] J. F. Ellison, L. S. Tesfatsion, V. W. Loose, and R. H. Byrne,  
 "Project Report: A Survey of Operating Reserve Markets in U.S. ISO/RTO-Managed Electric Energy Regions," *Sandia Report SAND2012-1000*, Sandia National Laboratories, September 2012.
- [26] C. Weber, "Adequate intraday market design to enable the integration of wind energy into the European power systems," *Energy Policy*, vol. 38, no. 7, pp. 3155–3163, Jul. 2010.
- [27] A. Ahmadi-Khatir, and R. Cherkaoui, "A probabilistic spinning reserve market model considering disco's different value of lost loads," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, 862–872, 2011.
- [28] M. A. Ortega-Vazquez and D. S. Kirschen, "Optimizing the spinning reserve requirements using a cost/benefit analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 24–33, Feb. 2007.

- [29] K. Kirk, M. Valdma, "Determination of Optimal Operating Reserves in Power Systems," *Oil Shale*, vol. 26, no. 3 pp. 220–227, 2009.
- [30] N. Chowdhury, "Probabilistic assessment of spinning reserve in isolated and interconnected generation systems," *Reliability Engineering & System Safety* vol. 46, no. 1, pp. 83–91, 1994.
- [31] M. E. Khan and R. Billinton, "Composite system spinning reserve assessment in interconnected systems," *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm., Distrib.*, vol. 142, no. 3, pp. 305–309, May 1995.
- [32] L. T. Anstine, R. E. Burke, J. E. Casey, R. Holgate, R. S. John, and H. G. Stewart, "Application of probability methods to the determination of spinning reserve requirements for the Pennsylvania–New Jersey–Mary–land interconnection," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS–82, no. 68, pp. 720–735, Oct. 1963.
- [33] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems Second Edition*, New York: Plenum Press, 1996.
- [35] Consectec, *Benefits and practical steps towards the integration of intraday electricity markets and balancing mechanisms*, Frontier Economics Ltd, London, 2005.

- [36] Robert C. Merton, "Option pricing when underlying stock returns are discontinuous," *Journal of Financial Economics*, Volume 3, Issues 1 - 2, pp. 125-144, January - March 1976.
- [37] P. Billingsley *Convergence of Probability Measures*. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2009
- [38] A. K. Dixit and R. S. Pindyck, *Investment Under Uncertainty*. Princeton NJ: Princeton Univ. Press, 1994.
- [39] J. Grefenstette, "Optimization of control parameters for genetic algorithms," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. SMC-16, pp. 122 - 128, 1986.

## **Abstract**

Operating reserves serve an important function in power system operation and control, by helping to overcome unscheduled generator outages and major load forecasting errors in power systems. Operating reserves are categorized as primary, secondary or tertiary reserves. Primary reserves adjust active generation to restore balance quickly between generation and load imbalance. Secondary reserves release the primary reserves and restore nominal system frequency. Lastly, tertiary reserves are activated manually by a system operator (SO) to prevent exhaustion of secondary reserves. Usually, the capacity of operating reserves is established by deterministic frameworks, which allocate the reserve either as a fixed percentage of the expected peak load, or as the capacity of the largest synchronous generator. This method is simple to apply and is in common use in many power systems. Despite the straightforwardness of the method, deterministic frameworks may cause uneconomical and insecure operation of a power system, by failing to take account of sources of uncertainty in the power system, such as the occurrence of generator contingencies and load fluctuation. To adjust for this, a probabilistic method has been widely applied to determine the capacity of operating reserves. It has been proposed that operating reserves' capacity may

be determined more effectively, both from a technical and an economical point of view. However, most previous studies neglect the interrelation between the operating reserves—an important aspect of the problem. Previous methods determine the required capacity of secondary and tertiary reserves according to their role in operation. In general, secondary reserves are intended to cope with load imbalance, while the required capacity of tertiary reserves is determined according to their ability to cope with a contingency such as generator outage. However, this conventional reserve operation strategy may cause problems in future power systems, which may experience increased load imbalance due to large-scale development of renewable sources, and abnormal temperatures. Renewable sources, such as photovoltaic or wind power generators, cause excess fluctuations in demand due to variations in wind speed and sunshine intensity. Previous methods, wherein only secondary reserves are activated to cope with load imbalance, require increased capacity of secondary reserves and entail great expense. Moreover, they result in power system collapse through a lack of capacity in secondary reserves. A typical example is the 9.15 South Korea rolling blackout occurring on September 15, 2011. Abnormally hot weather led to an increase in electricity demand from appliances such as air-conditioning units, and remaining secondary reserves were not sufficient to make up the imbalance between



demand and supply. As a result—although no generator or network outage occurred—secondary reserves became scarce due to large load imbalance. It is therefore insufficient to activate only secondary reserves to cope with load imbalance in future power systems, and integrated operation of secondary and tertiary reserves is necessary.

When determining the commitment of tertiary reserves, it is possible to vary the capacity of required secondary reserves, potentially resulting in a reduction in reserve operating costs. Hence, secondary and tertiary reserves are closely related to each other, and these correlations should be considered in the determination of commitment. This paper proposes a new method for calculating the capacity of secondary reserves required, based on functional and economical mutuality with tertiary reserves. Moreover, this paper suggests a method for committing tertiary reserves under real-time load imbalance in order to maintain the nominal frequency.

Keywords: load frequency control, reserve operation, secondary reserves; tertiary reserves, real-time load imbalance

Student number : 2008-20888